

## 유한 선형 자기쌍극자 모델에 대한 검증자료의 해석

김진후

동아대학교 토목·해양공학부

### 요 약

선형 자기쌍극자 모델의 하나인 철근에 대하여 3성분 자력계를 이용한 자력검층을 실시한 후 검층자료를 최소 자승법에 의한 역산을 이용하여 해석하였다. 본 실험에 사용된 철근의 길이는 1.12 m, 샘플링 간격은 0.05 m, 자력계와 철근사이의 거리는 0.3 m이며, 철근의 상단부를 깊이 0 m 지점에 고정하였다. 철근은 연직에 가깝도록 위치시켰다. FFT를 이용하여 평활화한 자기이상을 역산의 입력자료로 활용하였다. 검증자료의 해석을 위하여 선형 자기쌍극자의 상단부 심도, 길이, 단위 길이 당 자기모멘트, 자화방향(편각 및 북각), 경사방향과 경사각 등을 미지수로 설정하였다. 자기이상의 수평성분 및 수직성분 각각에 대한 역산 결과와 수평성분과 수직성분을 동시에 고려한 역산 결과를 비교하였는데 각각의 역산결과는 다소 차이를 보인다. 자기이상의 수평성분과 수직성분을 동시에 고려하여 역산을 수행하는 것이 각각의 성분을 역산하는 경우보다 정확한 해석이 가능한 것으로 판단된다. 이 때 철근 하단부의 추정 심도는 1.18 m로, 실제 심도인 1.12 m에 매우 근접하며, 철근의 북각은  $-76^\circ$  로 추정되었다. 철근의 북각이 음(-)의 값을 갖는 것은 철근의 유도자화 강도에 비하여 잔류자화 강도가 훨씬 커서, 전체적인 자화 방향이 철근의 상단 방향을 향하고 있기 때문으로 해석된다.

**주요어:** 선형 자기쌍극자, 자력검층, 자기이상, 역산, 철근

**Kim, Jin-Hoo, 1999, Interpretation of the Magnetic Logs for a Finite Line of Magnetic Dipoles Model. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 2, n. 2, p. 135-142.**

**ABSTRACT:** Interpretations of 3-component magnetic logging data obtained for a reinforced bar as a model of the line of the magnetic dipoles are conducted using a least squared inversion technique. The length of the bar is 1.12 m, sampling interval is 0.05 m, the distance between the bar and the borehole is 0.3 m, and the top of the bar is fixed at 0 m of depth. The bar is set to be approximately vertical. Magnetic anomalies smoothed with FFT are used as input data for the inversion. For the interpretation of magnetic logging data the depth to the top, the length, the magnetic moment per unit length, the direction of the magnetization (declination and inclination), and the bearing and plunge of the line of magnetic dipoles are left as unknown parameters. The comparison of the results obtained from the individual inversion of the horizontal component or the vertical component of the magnetic anomalies, and those from the simultaneous inversion of horizontal and vertical component of the magnetic anomalies shows that there exist some disagreements between each inversion result. The depth to the bottom of the bar, which is actually 1.12 m, is estimated as 1.18 m, and the inclination of the magnetization is estimated as  $-76^\circ$  by simultaneous inversion. The negative value of the inclination indicates that the strength of the remnant magnetization is much greater than that of the induced magnetization, so that the direction of the resultant magnetization points to the top of the bar.

**Key words:** line of the magnetic dipoles, magnetic logging, magnetic anomaly, inversion, reinforced bar

(Kim, Jin-Hoo, School of Civil and Ocean Engineering, Dong-A University, Pusan, 604-714, Korea. e-mail: jkim@daunet.donga.ac.kr)

## 1. 서 론

유한 선형 자기쌍극자는 중요한 3차원 모델의 하나로서, 폭이 좁고 길이가 유한한 자성체에 대한 자력탐사자료의 해석에 유용하게 사용된다. 이러한 자기쌍극자는 광맥 등의 지하자원탐사 뿐만 아니라 파이프, 케이싱 및 파일의 탐지 등 지반탐사 분야에도 활용이 가능하다.

유한 선형 자기쌍극자에 대한 자력탐사는 지표면 상에서 수행될 수도 있으나 자성체가 있는 주위에 검층공을 뚫어 검층공 내에서 수행 할 수도 있다. 지금까지 유한 선형 자기쌍극자 모델에 대한 연구는 주로 지표면 상에서의 자력탐사를 고려한 것이 대부분이며, 그 적용에 있어서 많은 제약이 따른다. 즉, 측선이 자기 쌍극자를 포함하는 평면과 동일 평면상에 있거나 혹은 수직인 경우 (Nettleton, 1942; Singh · Sabina, 1978), 자기쌍극자가 현지의 지하장의 방향으로 자화 및 경사진 경우(민경덕 외, 1988; Telford *et al.*, 1976) 등이다. 본 연구에서는 이러한 단점들을 배제하기 위하여 Jain (1991)이 제시한 임의 방향으로 자화된 유한 선형 자기쌍극자에 대한 지표면에서의 자기이상 계산식을 수정한 검층공 내에서의 자기이상 계산식(김진후 · 박경원, 1998)을 이용하여 정모델링 및 역산을 수행하였다.

자력 검층자료를 얻기 위하여 가장 일반적인 유한 선형 자기쌍극자 모델의 하나인 이형 철근을 사용하였으며, 3성분 자력계를 이용하여 자기이상의 수평 및 수직성분을 검층하였다. 또한 검층자료로부터 최소 자승법에 의한 역산을 수행함으로써 철근의 자화방향(편각 및 복각), 철근의 단위 길이 당 자기모멘트, 철근의 상단 위치 및 길이, 또한 철근의 경사 방향과 경사각을 구하는 유한 선형 자기쌍극자 모델에 대한 해석을 시도하였다.

## 2. 정모델링과 역산

### 2.1. 정모델링

Fig. 1에서 보는 바와 같이  $Y-Z$  평면상에 놓여 있는 선형 자기쌍극자의 길이를  $L_L$ , 경사각을  $\phi$ , 단위 길이당 자기모멘트를  $M_L$ , 이의 방향 코사인을  $(l, m, n)$ 이라 하고 쌍극자의 상단부가  $(0, 0, h_0)$ 에 위치할 때, 임의의 점  $P(x, y, z)$

에서 관측되는 임의방향으로 자화된 유한 선형 자기쌍극자에 의한 자기이상은 다음과 같다(김진후 · 박경원, 1998).

$$\begin{aligned} H_x &= G[(2cx - lp^2)u^3 \\ &\quad + (3cxp^2 - lp^4)u + bxp^4]_{L=0}^{L=L_L}, \\ H_y &= G[(bp^2 \cos \phi + 2ac \sin \phi - mp^2)u^3 \\ &\quad + (3acp^2 \sin \phi - mp^4)u \\ &\quad + (ab \sin \phi + c \cos \phi)p^4]_{L=0}^{L=L_L}, \\ H_z &= G[(bp^2 \sin \phi - 2accos \phi - np^2)u^3 \\ &\quad - (3acp^2 \cos \phi + np^4)u \\ &\quad - (ab \cos \phi - c \sin \phi)p^4]_{L=0}^{L=L_L}. \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서 } G &= \frac{M_L}{p^4(u^2 + p^2)^{3/2}}, \\ u &= L - (z - h_0) \sin \phi - y \cos \phi, \\ a &= y \sin \phi - (z - h_0) \cos \phi, \\ p^2 &= a^2 + x^2, \\ b &= m \cos \phi + n \sin \phi, \\ c &= lx + ma \sin \phi - na \cos \phi \end{aligned}$$

이며,

$$\begin{aligned} l &= \cos I_L \sin(\theta - D_L), \\ m &= \cos I_L \cos(\theta - D_L), \\ n &= \sin I_L, \end{aligned}$$

이다. 여기서,  $D_L$  과  $I_L$  은 각각 선형 자기쌍극자의 자화방향의 편각 및 복각이며,  $\theta$  는 자기쌍극자를 포함하는  $Y-Z$  평면의 주향이다.  $\theta$  와  $D_L$  은 지리적 북쪽 ( $X'$ ) 을 기준으로 시계방향으로 측정된 각이다.

식 (1)의 관측점  $P(x, y, z)$  는  $XYZ$  좌표계에서 정의되고 있으므로 지리적 좌표계로 정의된 관측점  $P(x', y', z')$  를  $XYZ$  좌표계로 표현하기 위해서는 다음과 같은 좌표변환 과정이 필요하다

$$[x, y, z] = [x', y', z'] \begin{bmatrix} \sin \theta, & \cos \theta, & 0 \\ -\cos \theta, & \sin \theta, & 0 \\ 0, & 0, & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

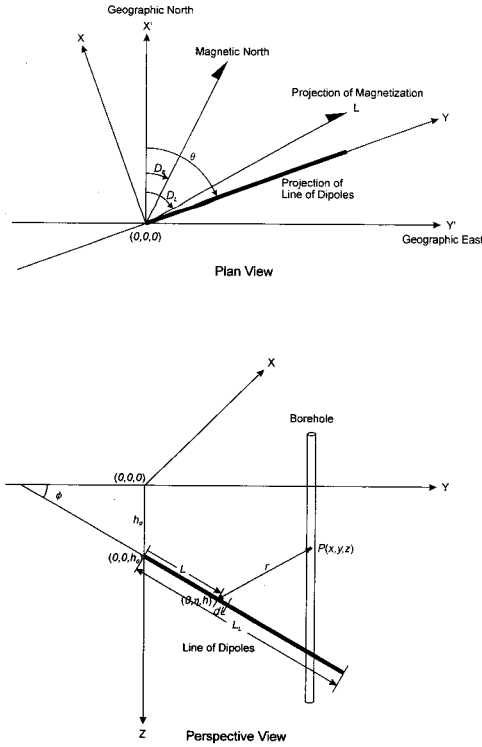


Fig. 1. A line of dipoles and an observation hole, and coordinate system.

선형 자기쌍극자에 의한 지자장 각 성분의 변화량, 즉 자기이상은

$$\begin{aligned} \Delta H_x &= H_x \sin(\theta - D_E), \\ \Delta H_y &= H_y \cos(\theta - D_E), \\ \Delta H_z &= H_z \end{aligned} \quad (3)$$

와 같이 표현된다. 여기서  $\Delta H_x$ 와  $\Delta H_y$ 는 각각  $H_x$ 와  $H_y$ 에 의한 지자장의 자기이상이며,  $\Delta H_z$ 는 지자장의 수직방향의 자기이상이다.  $D_E$ 는 지자장의 편각이다.

한편, 지자장의 수평방향의 자기이상  $\Delta H_h$ 는

$$\Delta H_h = \Delta H_x + \Delta H_y \quad (4)$$

로 구할 수 있다.

## 2.2. 역산

지자장의 자기이상의 수평성분만을 이용할 것인지, 수직성분만을 이용할 것인지, 아니면 수평성분과 수직성분을 함께 이용할 것인지를 결정한 후, 모델의 파라미터를 예측하기 위한 역산을 수행한다. 역산은 관측된 자기이상과 가장 잘 합치되는 새로운 모델을 제시한다. 앞 절에 제시한 정모델링 함수는 비선형이므로 역산은 반복과정을 거치게 되며, 반복을 거듭할수록 보다 잘 합치되는 모델을 제시한다.

본 연구에서는 최소 자승법을 이용한 역산 알고리즘을 사용했으며, 이 때 크기  $m$ 인 파라미터 수정 벡터  $dP$ 는 다음과 같이 표현된다(Marquardt, 1970).

$$dP = (A^T A + kI)^{-1} A^T e. \quad (5)$$

여기서  $A$ 는 크기  $n \times m$ 인 모델 함수의 각 파라미터에 대한 편미분 행렬이며,  $e$ 는 크기  $n$ 인 관측된 자기이상과 모델에 의해 계산된 자기이상의 차이 벡터이다. 한편,  $m$ 은 역산할 파라미터의 개수,  $n$ 은 검증자료의 개수,  $I$ 는 크기  $m$ 의 단위행렬, 그리고  $k$ 는 상수이다.

식 (5)에서  $kI$  항은  $A^T A$ 가 singular 이거나 singular에 가까울 경우 이의 역행렬이 불안정하게 되는 것을 방지한다(Inman, 1975).  $k$  값의 범위는  $10^{-4} < k < 1.0$  이 일반적이며(Marquardt, 1970),  $k$ 의 초기값으로  $k = 10^{-3}$  (Press et al., 1992) 또는  $k = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_{ij}^2}$  (Dimri, 1992)

를 사용할 수 있다.

정모델링을 위하여 여러 파라미터들이 사용되고 있으나, 사전 정보를 이용할 수도 있으므로 모든 파라미터들을 항상 한꺼번에 역산할 필요는 없다. 역산할 필요가 없다고 판단되는 파라미터에 대하여는 역산 과정에서 고정시킴으로써 해의 안정성을 증진시킬 수 있다.

## 3. 자료취득 및 처리

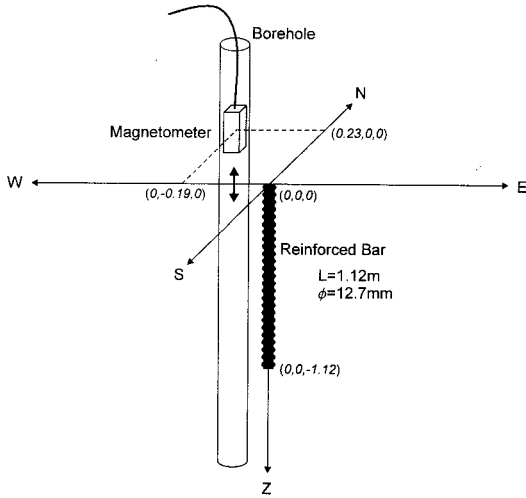


Fig. 2. Experimental setup for a magnetic logging.

유한 선형 자기쌍극자 모델로 길이 1.12 m, 직경 12.7 mm인 이형철근(D13)을 이용하여 Fig. 2와 같이 설치한 후 시험실 내에서 3성분을 측정할 수 있는 Bartington사의 Mag-03MSS 자력계를 이용하여 측정하였다. 철근의 상단 위치를 (0,0,0)으로 하고 검측공은 지리적 평면좌표로 (0.23, -0.19)에 위치시켰다. 자력검층은 심도 -0.4 m부터 1.5 m까지 매 0.05 m마다 연직 방향으로 내리면서 측정하였다. 측정된 자료는 A/D 변환기를 통하여 디지털 값으로 바뀐 후 컴퓨터에 저장된다. 자기이상은 철근이 없는 상태에서 측정된 배경 자력치를 철근이 있는 상태에서 측정한 자력치에서 빼주어 구했다. Fig. 3은 배경 자력치의 측정값을 보여주는데 수평분력은 19.74~30.07  $\mu T$ , 수직분력은 43.67~52.82  $\mu T$ 로 많은 변화를 보인다. 이는 실험실 바닥 및 천장에 있는 철근 및 철제 앵글 등 자성체와 실험실 주위에 있는 자성체의 영향으로 판단된다.

Fig. 4에서 점으로 표시된 자료는 철근에 대하여 상기 방법으로 관측된 자기이상을 보여준다. 그림에서 보듯이 전체적으로 수평성분은 -2.95~1.92  $\mu T$ 의 자기이상을 보이며, 수직성분은 -0.97~1.55  $\mu T$ 의 자기이상을 보이고 있으나 인접 측정값 사이에 큰 동요(fluctuation)를 나타낸다. 배경 자력치가 상대적으로 평활하고 자력 검층시

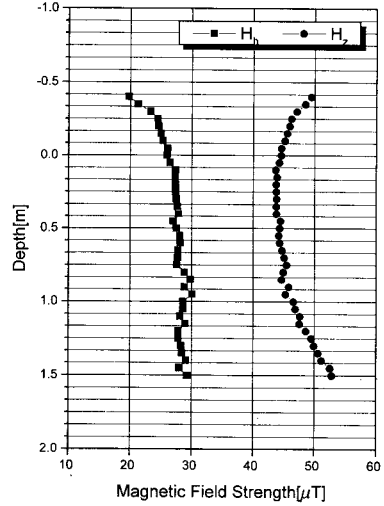


Fig. 3. Magnetic field strength in the Lab. Those data are used as background data for magnetic anomaly calculations.

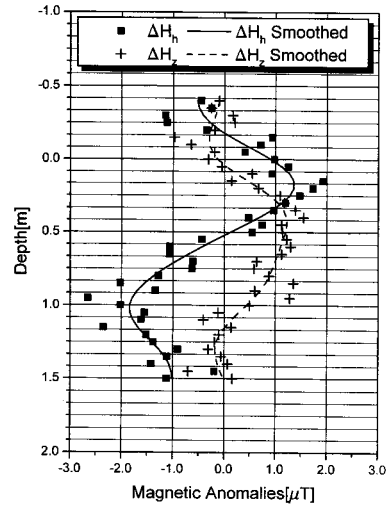


Fig. 4. Comparison of observed data and those after FFT smoothed. pts=5 is used for smoothing.

자력계 외에는 이동 물체가 없으며, 동요가 지자장의 일변화 범위를 넘는 것으로 미루어볼 때, 이는 자력계의 연직성 결여에 기인하거나 철근의 단위 길이 당 자기모멘트의 불균질성에 기인하는 것

으로 보인다. 따라서 역산을 수행하기에 앞서서 자기이상치의 평활화가 필요하다.

자료의 평활화를 위하여 우선 선형적인 경향을 제거한 후 FFT를 이용하여 검증자료에 저주파 통과 윈도우 함수를 적용하고, 다시 선형적인 경향을 삽입하는 평활화 기법(Press et al., 1992)을 사용하였다. 윈도우 함수를 작성함에 있어 평활화 정도를 정의하는 상수  $pts$ 가 사용되는데 이 상수는 평활화 되는 자료의 개수를 의미하며 이를 이용한 윈도우 함수  $W$ 는 다음과 같다.

$$W = \text{Max} \left\{ 0, 1 - \left( \frac{pts \cdot i}{m} \right)^2 \right\}. \quad (6)$$

여기서  $m$ 은 전체 자료의 개수이며,  $i$ 는 윈도우 함수의 주파수 인덱스이다. 따라서  $pts=0$ 인 경우  $W=1$ 이 되어 평활화는 이루어지지 않으며,  $pts$  값이 클수록 평활화는 증진된다. 본 검증자료에는  $pts=5$ 를 적용하였으며, 이 때 Fig. 4에서 보듯이 자료의 동요를 적절히 제거할 수 있었다.

#### 4. 결과 및 토의

Fig. 5는 평활화한 자기이상 중 수평성분만을 이용하여 역산한 결과에 의한 계산치와 관측치를 비교한 것이며, 역산 결과는 Table 1에서 보는 바와 같다. 그림에서 보듯이 자기이상의 수평성분

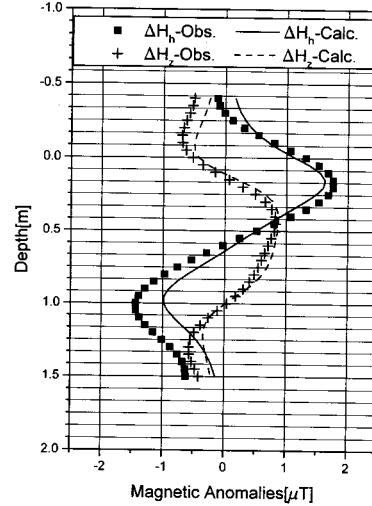


Fig. 6. Results of vertical component inversion. FFT smoothed data are used as input data.

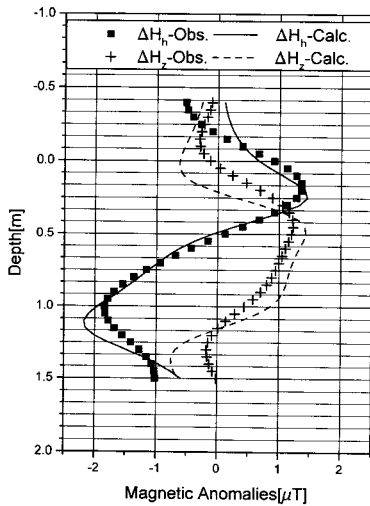


Fig. 5. Results of horizontal component inversion. FFT smoothed data are used as input data.

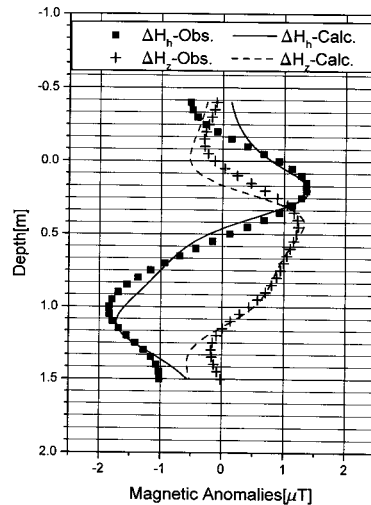


Fig. 7. Results of simultaneous inversion. FFT smoothed data are used as input data.

관측치와 추정 모델에 의한 계산치는 어느 정도 일치하고 있음을 알 수 있으나, 수직성분 관측치와 계산치 사이에는 많은 차이를 보인다. Fig. 6은 평활화한 자기이상 중 수직성분만을 이용하여 역산한 결과에 의한 계산치와 관측치를 비교한 것이며, 역산 결과는 Table 1에서 보는 바와 같다. 이 역시 자기이상의 수직성분 관측치와 추정 모델에 의한 계산치가 어느 정도 일치하고 있음을 알 수 있으나 수평성분 관측치와 계산치 사이에는 많은 차이를 보인다. 이는 선형 자기쌍극자에 대한 자력 검증자료를 해석함에 있어서 자기이상의 어느 한 성분만을 이용할 경우 모델 추정에 많은 오류를 내포할 가능성이 큼을 제시한다.

Fig. 7은 평활화한 자기이상의 수평성분과 수직성분을 동시에 이용하여 역산한 결과에 의한 계산치와 관측치를 비교한 것이며, 역산 결과는 Table 1에서 보는 바와 같다. 그림에서 보듯이 자기이상의 수평성분 관측치와 수직성분 관측치가 모두 추정 모델에 의한 계산치와 어느 정도 일치하고 있음을 알 수 있다.

Table 1에서 보듯이 자기이상의 수평성분을 이용하여 역산할 경우 rms 오차를 62% 까지 줄일 수 있다. 그러나 철근의 상단지점의 위치는 실제 위치보다 0.28 m 하부로 추정되었으며, 철근의 길이는 실제 길이보다 0.24 m 짧게 추정되었다. 철근의 상단지점의 위치와 철근의 길이로부터 구한 철근의 하단지점의 위치는 1.16 m로 추정되는데, 이는 실제 값인 1.12 m와 거의 일치하고 있으며, 검층 간격이 0.05 m임을 감안할 때 거의 정확하게 추정되었음을 알 수 있다. 철근의 경사각은 92°로 이 역시 실제 경사각 90°와 매우 근사한 값을 얻을 수 있었다. 철근의 자화방향 중 북각이 -74.8°를 보이고 있는 데 이는 지자장에 의한 철근의 유도자화보다 철근 자체가 갖는 잔류자화의 강도가 훨씬 크고, 이 철근이 지자장의 수직분력 방향과는 반대 방향으로 수직분력 방향이 형성되도록 놓여 있음을 보여준다. 또한 이 철근의 단위 길이 당 자기 모멘트는 0.18 A-m로 추정되었다.

자기이상의 수직성분만을 이용하여 역산할 경우 rms 오차는 59%로 수평성분의 역산에 따른 rms

**Table 1.** Inversion results for a finite line of magnetic dipoles model.

Parameters	Estimation by Horizontal Component Inversion	Estimation by Vertical Component Inversion	Estimation by Horizontal and Vertical Component Inversion	Remarks
Length (m)	0.88	0.88	0.93	Known as 1.12
Declination of the Magnetization (Deg.)	71.7	72.6	88.4	
Inclination of the Magnetization (Deg.)	-74.8	-114.4	-75.7	
Magnetic Moment per unit length (A-m)	0.18	0.10	0.17	
Bearing of the Magnetic Dipoles (Deg.)	-37.3	49.1	29.3	Meaningless for the 90° plunging model
Plunge of the Magnetic Dipoles (Deg.)	92.0	101.5	99.0	Known as 90°
Top of the Magnetic Dipoles (m)	0.28	0.12	0.25	Known as 0.0 m
Bottom of the Magnetic Dipoles (m) - Induced from the top and the length of the dipoles	1.16	1.00	1.18	Known as 1.12 m
RMS Error (%)	62	59	127	

오차와 비슷하다. 철근의 상단지점의 위치는 실제 위치보다 0.12 m 하부로 추정되었으며, 철근의 길이는 실제 길이보다 0.24 m 짧게 추정되었다. 철근의 하단지점의 위치는 1.00 m로 추정되었는데, 이는 실제 위치와 0.12 m의 차이를 보인다. 철근의 경사각은  $101.5^\circ$  로 실제 경사각  $90^\circ$  과는  $10^\circ$  이상의 차이를 보이고 있다. 철근의 자화방향 중 북각이  $-114.4^\circ$  로 추정되어 수평분력의 역산 결과와는 많은 차이를 보이고 있지만, 이 역시 지지장에 의한 철근의 유도자화보다 철근 자체가 갖는 잔류자화의 강도가 훨씬 크고, 이 철근이 지지장의 수직분력 방향과는 반대 방향으로 수직분력 방향이 형성되도록 놓여 있음을 보여준다. 또한 이 철근의 단위 길이 당 자기 모멘트는 0.10 A-m로 추정되었다.

이상의 역산 결과는 자기이상의 수평성분 또는 수직성분만을 이용하여 역산한 결과로서 이상적으로는 두 역산 결과가 일치하여야 하나, 주위의 잡음, 자력계의 연직성 결여, 자기 이상체의 불균질성 등이 역산 결과에 차이를 나타내는 원인으로 작용하는 것으로 보인다.

이와 같은 점을 고려할 때 자기이상의 수평성분 또는 수직성분만을 이용하여 역산하는 것보다는 수평성분과 수직성분을 동시에 역산하는 것이 바람직한 것으로 보인다. 동시 역산의 경우 rms 오차는 127%로 각 성분의 역산에 따른 rms 오차에 비해 크게 나타난다. 철근의 상단지점의 위치는 실제 위치보다 0.25 m 하부로 추정되었으며, 철근의 길이는 실제 길이보다 0.19 m 짧게 추정되었다. 철근의 하단지점 위치는 1.18 m로 추정되어 실제 위치와 0.06 m의 차이를 보인다. 철근의 경사각은  $99^\circ$  로 추정되어 실제 경사각과는  $9^\circ$  의 차이를 보이고 있다. 철근의 자화방향 중 북각은  $-75.7^\circ$  로 추정되었는데, 이 역시 철근의 잔류자화 강도가 유도자화 강도보다 훨씬 크고, 이 철근의 수직분력 방향이 지지장의 수직분력 방향과는 반대 방향으로 놓여 있음을 보여준다. 철근의 단위 길이 당 자기 모멘트는 0.17 A-m로 추정되었다.

## 5. 결론

선형 자기쌍극자 모델의 하나인 철근에 대하여 3성분 자력계를 이용한 자력검증을 실시한 후 관측자료를 최소 자승법에 의한 역산을 이용하여 해석하였다. 연직으로 놓여 있는 철근에 대하여 거

리 0.3 m에서 매 0.05 m마다 측정된 관측자료로부터 배경 자력값을 빼어 자기이상을 구하였으며, 이를 FFT를 이용하여 평활화한 후 역산의 입력자료로 활용하였다. 역산에는 검증공이 자기 쌍극자가 놓인 평면상에 놓이지 않는 경우에도 적용 가능한 정모델링 알고리즘이 사용되었다. 검증자료의 해석을 위하여 선형 자기쌍극자의 상단부 위치, 길이, 단위 길이 당 자기모멘트, 자화방향(편각 및 북각), 경사방향과 경사각 등을 미지수로 설정하였다. 자기이상의 수평성분과 수직성분 각각에 대한 역산결과 rms오차는 약 60% 정도로 줄일 수 있었으나 추정된 모델 파라미터 사이에는 다소 차이를 보이고 있다. 이는 주위의 잡음, 자력계의 연직성 결여, 자기 이상체의 불균질성 등이 파라미터 추정에 있어서 차이를 나타내는 원인으로 작용하는 것으로 보인다. 자기이상의 수평성분과 수직성분을 동시에 고려하여 역산을 수행한 결과 철근의 상단부 위치는 0.25 m, 철근의 길이는 0.93 m, 철근의 단위 길이 당 자기모멘트는 0.17 A-m, 철근의 편각은 약  $88^\circ$ , 철근의 북각은 약  $-76^\circ$ , 철근의 경사각은  $99^\circ$ , 철근의 경사방향은 약  $29^\circ$  로 추정되었다. 철근의 상단부 위치와 길이로부터 구한 철근의 하단부 위치는 1.18 m로 약 0.06 m의 오차를 보이고 있다. 철근의 북각이 음(-)의 값을 갖는 것은 철근의 유도자화 강도에 비하여 잔류자화 강도가 훨씬 커서 전체적인 자화 방향이 철근의 상단 방향을 향하고 있기 때문으로 해석된다.

## 사 사

이 논문은 1998학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드린다. 자력 검증자료 수집을 함께 해 준 탐사공학 실험실의 구성원과 본 논문의 질을 높이기 위하여 세심한 심사를 하여주시신 두 분의 심사위원께 감사드린다.

## 참고문헌

- 김진후, 박경원, 1998, 유한 선형 자기쌍극자에 대한 자력 검증곡선 모델링, 지구과학회지, 19, 610-615.
- 민경덕, 서정희, 권병두, 1988, 응용지구물리학. 우성문화사, 서울.

- Dimri, V., 1992, *Deconvolution and Inverse Theory: Application to Geophysical Problems*, Elsevier Science, Amsterdam.
- Jain, B. K., 1991, Magnetic effect of a finite, arbitrarily oriented line of dipoles, *Geophysics*, 56, 1153-1157.
- Inman, J. R., 1975, Resistivity Inversion with Ridge Regression, *Geophysics*, 40, 798-817.
- Marquardt, D. W., 1970, Generalized Inverses, Ridge Regression, Biased Linear Estimation, and Nonlinear Estimation, *Technometrics*, 12, 591-612.
- Nettleton, L. L., 1942, Gravity and magnetic calculations, *Geophysics*, 7, 293-310.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., 1992, *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, 2nd. Ed., Cambridge University Press, New York.
- Singh, S. K. and Sabina, F. J., 1978, Magnetic anomaly due to a vertical right circular cylinder with arbitrary polarization, *Geophysics*, 43, 497-506.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., and Keys, D. A., 1976, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, London.
- 
- 1999년 2월 25일 원고접수  
1999년 6월 2일 원고채택