

◎ 論 文

퍼스널 컴퓨터를 이용한 比抵抗 物理檢層資料의 自動解析

金 鎮 厚*

(1988년 9월 23일 접수)

Automatic Interpretation of the Borehole Normal Resistivity Data by Using a Personal Computer

Jin-Hoo Kim

Key Words : Borehole (試錐孔), Normal Resistivity Data (노멀 比抵抗 檢層資料), Point-electrode Focusing Method (電流指向法), Approximate Apparent Resistivity (近似比抵抗), Bed Boundary Coefficient (地層境界係數), Automatic Interpretation (自動解析)

Abstract

A data transform is performed by using a point-electrode focusing method in order to obtain accurate and objective interpretation of the borehole normal resistivity data. Two new synthetic curves can be generated through the data transform. The one is an approximate apparent resistivity curve, which would be used to predict the true resistivity of the formation. The other one is a bed boundary coefficient curve, which would be used to distinguish bed boundaries.

The accuracy of the normal data interpretation can be improved and this method takes much less computational time than a linear inversion technique. Moreover, this method does not require an initial guess model and limitation of number of unknown parameters. Since this algorithm can be run on a personal computer, an immediate interpretation would be possible at the field work site.

If an additional set of electrodes ($a=125cm$) is attached to a normal resistivity tool which is being used ($a=25cm, 50cm, 100cm$), the apparent resistivity for the point-electrode focusing device can be calculated, and it would maximize the use of short and long normal resistivity data and promote the accuracy of the interpretation.

1. 序 論

電氣比抵抗 物理檢層 자료는 일반적으로 專門分析家에 의하여 해석되어 지거나 逆算用 프로그램을 이용하여 컴퓨터에 의하여 分析 처리된다. 前

者は 현장에서 얻은 겉보기 觀測資料를 그대로 사용하기 때문에 地層構造나 地層의 比抵抗 特性에 대한 定量的 해석이 分析家の 經驗이나 主觀에 크게 좌우되는 단점을 갖고 있으며, 後者は 보다 客觀적인 資料解析이 가능한 반면 컴퓨터 活用面에 있어서 計算速度가 느리고 逆算을 위한 初期値 입

* 正會員, 東亞大學校 工科大學 海洋工學科

력시 地層의 수를 미리 設定하여야 하는 단점이 있다. 本人은 本 研究를 통하여 이와같은 단점을 補完하여 Normal法에 의하여 얻어진 電氣比抵抗檢層曲線을 보다 신속하고 正確하게 客觀적으로 分析할 수 있는 自動化된 分析方法을 모색해 보고자 한다. 또한 퍼스날 컴퓨터를 사용하여 현장에서 직접 電氣比抵抗 물리검층 자료의 解析을 가능케 함으로써 向後 試錐計劃 및 檢層計劃 수립에 필요한 判斷資料를 효율적으로 제공하고자 한다.

Normal法에 의한 比抵抗 物理檢層 반응곡선의 계산은 Guyod¹⁾를 비롯하여 Dakhnov²⁾, Daniels³⁾, Yang과 Ward⁴⁾, Drahos⁵⁾, Kim⁶⁾ 등에 의하여 研究되었으며, 地層의 두께 및 實際比抵抗을 구하기 위한 逆算法은 Yang과 Ward⁴⁾가 1차원 모델에 대하여, Kim⁶⁾이 2차원 모델에 대하여 研究하였다.

Normal法에 의해서 점전극을 통해 흘러들어가는 電流는 전극주위의 媒質의 電氣傳導度 특성에 따라 四方으로 확산되기 때문에 泥水 및 泥水의 地層內 침투에 대한 영향을 排除할 수 없고, 따라서 覓보기 比抵抗만 가지고 地層의 경계나 實際比抵抗을 類推하는 데에는 상당한 어려움이 수반된다. 이와같은 Normal法の의 단점을 補完하고자 開發된 電氣檢層 방법이 電流指向法(focusing method)이다. 電流指向法중 Laterolog-7(LL7)은 Doll⁷⁾에 의하여 처음 소개가 되었으며 이 방법은 1개의 中心電極(center electrode)과 상하 2개의 護衛電極(guard electrode) 및 4개의 電位電極을 사용하여 전류를 試錐孔의 수직방향으로 指向시킴으로써 전류를 地層내 깊숙이 浸透시키는 효과를 갖고 있다. 이와같은 電極配列을 이용할 때 水平多層 또는 圓筒形 多層構造에 있어서 電流指向法에 의한 覓보기比抵抗 曲線을 算出하는 방법을 제시하고, Normal法에 의해 얻은 覓보기比抵抗을 電流指向法에 의한 覓보기比抵抗으로 변환함으로써 地層의 實際比抵抗에 가까운 近似比抵抗을 線型逆算法(linear inversion)을 사용하지 않고 얻고자 한다. 또한 이와같은 資料變換 과정을 통하여 얻어지는 中心電極 상부와 하부의 近似比抵抗 및 電流密度의 차이를 이용하여 地層의 경계를 보다 明確하게 區分할 수 있는 방법을 모색해 보자고 한다.

本 研究의 効用性을 입증하기 위하여 資料變換을 이용한 自動化된 解析方法을 실제 현장에서 얻

은 比抵抗 檢層曲線에 적용시켜 보았으며, 本 方法에 의한 解析의 결과를 線型逆算法으로 구한 결과와 比較하여 보았다.

2. 電流指向 覓보기比抵抗 計算

2.1 理論的 背景

一般的으로 로거(logger)가 比抵抗이 큰 얇은 지층을 통과할 때 覓보기比抵抗은 실제比抵抗과 상당한 차이를 보이게 되며 이는 比抵抗이 큰 지층보다는 상대적으로 比抵抗이 작은 試錐孔內의 泥水를 통하여 더 많은 전류가 흐르기 때문이다. 이러한 전류의 分散現狀을 방지하고 中心電極에서 나오는 전류가 比抵抗이 큰 얇은 지층으로 指向할 수 있도록 하기위해서 中心電流電極 이외에 1개의 護衛電極과 2개의 電位電極을 中心電極의 상부와 하부에 Fig. 2-1과 같이 각각 대칭형태로 配列한다. 이때 상부 및 하부 護衛電極 A와 A'에서 나오는 전류의 세기 I_A 및 $I_{A'}$ 를 中心電極 O에서의 전류를 세기 I_0 에 대하여 적절히 조절하면 電位電極 M과 N 및 M'과 N'사이의 電位差를 없앨 수 있다. 이로부터

$$\begin{aligned} U_M &= U_N \\ U_{M'} &= U_{N'} \end{aligned} \quad (2-1)$$

의 두개의 電位關係式을 얻을 수 있으며, 여기에 U는 각 전극에 있어서의 電位이다. 결국 이와같은 電極配列과 電流調節을 통하여 Fig. 2-1에서 보는 바와 같이 試錐孔에 수직인 방향으로의 전류의 흐름이 誘導된다.

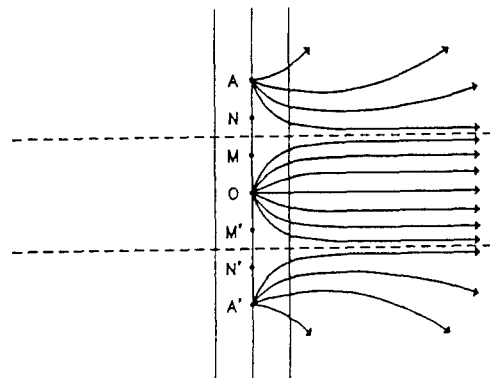


Fig. 2-1 Electrode array for point-electrode focusing device, showing current distribution about it

萬一 모든 전극이 매우 작아서 점 전극으로 看
做될 수 있다면, 均等媒質내에서 측정되는 M ,
 N 및 M' , N' 전극 위치에서의 電位는 重疊의 원
리에 의하여

$$\begin{aligned} U_M &= \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{I_0}{OM} + \frac{I_A}{AM} + \frac{I_{A'}}{A'M} \right) \\ U_N &= \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{I_0}{ON} + \frac{I_A}{AN} + \frac{I_{A'}}{A'N} \right) \\ U_{M'} &= \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{I_0}{OM'} + \frac{I_A}{AM'} + \frac{I_{A'}}{A'M'} \right) \\ U_{N'} &= \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{I_0}{ON'} + \frac{I_A}{AN'} + \frac{I_{A'}}{A'N'} \right) \end{aligned} \quad (2-2)$$

가 된다. 여기서 ρ 는 媒質의 比抵抗이며 OM 은
전극 O 와 M 間的 거리이고 AM , $A'M$, \dots ,
 AN' , $A'N'$ 역시 각 전극간 距離를 표시한다.
식(2-1)과 식(2-2)를 連립하여 풀면 電流比率
 $C = I_A/I_0$ 과 $C' = I_{A'}/I_0$ 를 구할 수 있다. 均等媒質
內에서 $I_A = I_{A'}$ 이므로

$$C = C' = \frac{AM \cdot AN \cdot A'M \cdot A'N}{OM \cdot ON \cdot (A'M \cdot A'N - AM \cdot AN)} \quad (2-3)$$

이 된다. 따라서 전극 M 및 N 에서의 電位는

$$U_M = U_N = \frac{\rho I_0}{4\pi} \left\{ \frac{1}{OM} + C \left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A'M} \right) \right\} \quad (2-4)$$

가 되며 O 점에서의 絶보기比抵抗은

$$\begin{aligned} \rho_a &= \frac{4\pi}{\left\{ \frac{1}{OM} + C \left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A'M} \right) \right\}} \\ &\cdot \frac{U_M}{I_0} = K_F \frac{U_M}{I_0} \end{aligned} \quad (2-5)$$

가 된다. 여기서 K_F 는 電流指向 전극배열에 따른
geometric factor로서

$$K_F = \frac{4\pi}{\left\{ \frac{1}{OM} + C \left(\frac{1}{AM} + \frac{1}{A'M} \right) \right\}} \quad (2-6)$$

이다. 만일 전극간 距離가 $AN = MN = OM =$
 $OM' = M'N' = A'N' = a$ 로 一定하면 식(2-3)으로
부터 $C = C' = 10/9$ 이며, 이때 K_F 는 식(2-5)로부
터

$$K_F = \frac{24}{11} \pi a \quad (2-7)$$

가 된다.

非均等媒質에 있어서의 전극 M , N 및 M' ,
 N' 의 위치에서의 電位 또한 重疊의 원리에 의하
여 구할 수 있다. 식(2-2)를 달리 표현하면

$$U_M = U_M(O) + U_M(A) + U_M(A')$$

$$U_N = U_N(O) + U_N(A) + U_N(A') \quad (2-8)$$

$$U_{M'} = U_{M'}(O) + U_{M'}(A) + U_{M'}(A')$$

$$U_{N'} = U_{N'}(O) + U_{N'}(A) + U_{N'}(A')$$

이 되며, 여기서 괄호 속의 O , A 및 A' 는 電位
를 發生하는 전류전극을 표시한다. 例로 $U_M(O)$
는 전류전극 O 에 의해 發生하는 전극 M 에서의
電位이다. 이는 電極間 距離 a 를 사용하는
Normal法에 있어서의 電位와 같은 것이며,
Normal法 電極배열의 geometric factor $K_N = 4\pi$
 a 를 이용하면 Normal 絶보기비저항 $\rho_a(OM)$ 으
로부터

$$U_M(O) = \frac{I_0}{4\pi a} \rho_a(OM) \quad (2-9)$$

을 구할 수 있으며 괄호 속의 OM 은 電流電極과
電位電極의 쌍을 표시한다. 이와같은 原理를 이용
하여 식(2-8)을 다시쓰면

$$\begin{aligned} U_M &= \frac{I_0}{4\pi} \left\{ \frac{\rho_a(OM)}{OM} + C \right. \\ &\quad \left. \frac{\rho_a(AM)}{AM} + C' \frac{\rho_a(A'M)}{A'M} \right\} \\ U_N &= \frac{I_0}{4\pi} \left\{ \frac{\rho_a(ON)}{ON} + C \frac{\rho_a(AN)}{AN} \right. \\ &\quad \left. + C' \frac{\rho_a(A'N)}{A'N} \right\} \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$\begin{aligned} U_{M'} &= \frac{I_0}{4\pi} \left\{ \frac{\rho_a(OM')}{OM'} + C \frac{\rho_a(AM')}{AM'} + C' \right. \\ &\quad \left. \frac{\rho_a(A'M')}{A'M'} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{N'} &= \frac{I_0}{4\pi} \left\{ \frac{\rho_a(ON')}{ON'} + C \frac{\rho_a(AN')}{AN'} + C' \right. \\ &\quad \left. \frac{\rho_a(A'N')}{A'N'} \right\} \end{aligned}$$

과 같이 되며, 電位關係式(2-1)에서 두개의 未知
數 C 와 C' 를 구하면

$$C = \frac{\begin{vmatrix} P_3 & P_2 \\ Q_3 & Q_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} P_1 & P_2 \\ Q_1 & Q_2 \end{vmatrix}} \quad (2-11)$$

$$C' = \frac{\begin{vmatrix} P_1 & P_3 \\ Q_1 & Q_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} P_1 & P_2 \\ Q_1 & Q_2 \end{vmatrix}}$$

이다. 여기서

$$P_1 = \frac{\rho_a(AM)}{AM} - \frac{\rho_a(AN)}{AN},$$

$$P_2 = \frac{\rho_a(A'M)}{A'M} - \frac{\rho_a(A'N)}{A'N},$$

$$P_3 = \frac{\rho_a(ON)}{ON} - \frac{\rho_a(OM)}{OM},$$

$$Q_1 = \frac{\rho_a(AM')}{AM'} - \frac{\rho_a(AN')}{AN'},$$

$$Q_2 = \frac{\rho_a(A'M')}{A'M'} - \frac{\rho_a(A'N')}{A'N'},$$

$$Q_3 = \frac{\rho_a(ON')}{ON'} - \frac{\rho_a(OM')}{OM'}$$

이다. 식(2-11)에서 구한 C 와 C' 를 식(2-10)에代入하여 $U_M (= U_N)$ 및 $U_M' (= U_N')$ 를 구한 다음 이로부터 전극 M 및 M' 에 대한 上部 및 下部 겉보기比抵抗 $\rho_a(up)$ 및 $\rho_a(dn)$ 을 구하면

$$\rho_a(up) = \frac{K_F}{4\pi} \left\{ \frac{\rho_a(OM)}{OM} + C \frac{\rho_a(AM)}{AM} + C' \frac{\rho_a(A'M')}{A'M'} \right\} \quad (2-12)$$

$$\rho_a(dn) = \frac{K_F}{4\pi} \left\{ \frac{\rho_a(OM')}{OM'} + C \frac{\rho_a(AM')}{AM'} + C' \frac{\rho_a(A'M')}{A'M'} \right\}$$

가 된다. 만일 電極間 거리가 a 로서 一定하다면

$$K_F = \frac{24}{11} \pi a \text{이므로 上部 및 下部 겉보기比抵抗은}$$

$$\rho_a(up) = \frac{6}{11} \left\{ \rho_a(OM) + \frac{C}{2} \rho_a(AM) + \frac{C'}{4} \rho_a(A'M') \right\} \quad (2-13)$$

$$\rho_a(dn) = \frac{6}{11} \left\{ \rho_a(OM') + \frac{C}{4} \rho_a(AM') + \frac{C'}{2} \rho_a(A'M') \right\}$$

의 關係式으로부터 구할 수 있다.

O 점의 電流指向 겉보기비저항을 $\rho_a(up)$ 과 $\rho_a(dn)$ 의 평균 겉보기비저항으로부터 구하면

$$\rho_a = \frac{2\rho_a(up) \cdot \rho_a(dn)}{\rho_a(up) + \rho_a(dn)} \quad (2-14)$$

이 되고, 상부 및 하부 겉보기比抵抗 比率와 電流比率에 對數를 취하면

$$RR = \log \left\{ \rho_a(up) / \rho_a(dn) \right\}$$

$$CR = \log \{ C/C' \} \quad (2-15)$$

를 얻을 수 있다.

2.2 水平多層構造

중심전극 O 점에서 電流指向 겉보기비저항을 계산하기 위하여 O 점을 中心으로 각각 다른 축점의

位置 및 전극간격을 사용하는 12개의 Normal 겉보기비저항이 要求된다. Normal 겉보기비저항은 Yang과 Ward⁴⁾가 제시한 점화식을 이용하여 任意의 數의 水平多層構造에 대하여 구할 수 있으며, 이를 바탕으로 전류지향 겉보기비저항 계산이 가능하다.

Fig. 2-2는 전류지향 겉보기비저항과 Normal 겉보기비저항을 地層의 실제비저항과 比較한 것으로서 3層 구조에 있어서 周邊層 비저항 보다 中央層의 비저항이 훨씬 큰 경우 (resistive bed)이다. 이때 中央層의 周邊層에 대한 比抵抗 對比(R_t/R_s)로서 50을 가정하였으며 지층의 두께를 1이라 할 때 Normal 및 전류지향 로거의 전극간 거리는 0.25이다. 그림에서 보듯이 로거가 비저항이 큰 地層을 통과할 때 Normal법에 의한 겉보기비저항은 地層의 실제비저항과 상당한 차이가 있으며 電流指向法을 사용할 때 실제비저항에 近接하는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

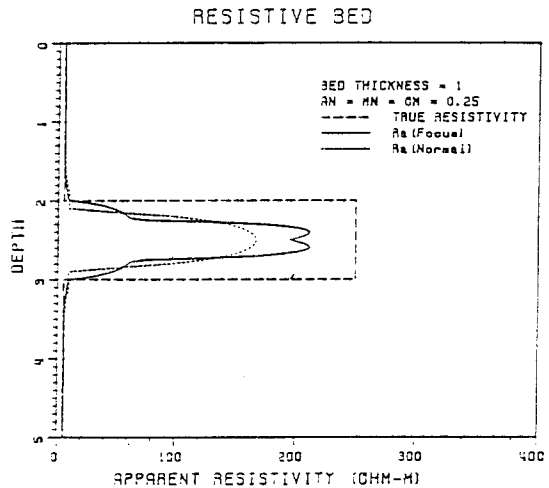


Fig. 2-2 Apparent resistivities for resistive thin bed

2.3 圓筒形 多層構造

地層의 두께가 로거의 전극간격에 비하여 상당히 클 때 이 地層은 圓筒形의 구조로서 해석이 가능해진다. Normal 겉보기比抵抗은 Drahos⁵⁾가 제시한 점화식을 이용하여 任意의 數의 圓筒形 多層構造에 대하여 구할 수 있으며, 이 모델에서는 시추공의 존재와 泥水 뿐만 아니라 泥水의 地層內 浸透가 電流指向 겉보기비저항에 과연 얼마나 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 전극간격을 넓

허가면서 서로 다른 몇가지 모델을 고려하였다. 중심전극 O점에서의 電流指向 綫보기저항을 계산하기 위해서는 측정의 위치에 상관없이 4개의 서로 다른 전극간격(a, 2a, 4a, 5a)을 사용했을 때의 Normal 綫보기비저항만이 사용된다. 왜냐하면 이와같은 圓筒形 多層構造에 있어서

$\rho_a(AM) = \rho_a(OM) = \rho_a(OM') = \rho_a(A'N')$ 이고,
 $\rho_a(AM) = \rho_a(ON) = \rho_a(ON') = \rho_a(A'M')$ 이며,
 $\rho_a(AM') = \rho_a(A'M)$ 및 $\rho_a(AN') = \rho_a(A'N)$ 이기 때문이다.

Fig. 2-3은 地層내 泥水の 浸透가 전혀 없고 泥水의 地層에 대한 比抵抗 對比($R_m : R_t$)가 1 : 200인 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 電流指向法에 의한 비저항곡선은 그 기울기가 Normal법에 의한 비저항곡선보다 작아서 地層의 實際比抵抗에 대한 偏差가 작을 뿐만 아니라 전극간격이 시추공의 직경(d)에 비하여 충분히 클 때 Normal 비저항 곡선보다 빠르게 地層의 實際比抵抗에 수렴하는 것을 알 수 있다.

Fig. 2-4는 泥水, 浸透層 및 地層간의 比抵抗 對比($R_m : R_t : R_l$)가 1 : 50 : 200이며, 浸透층의 직경(D_i)이 시추공 직경의 10배($D_i = 10d$)로서 浸透가 비교적 많이 일어난 경우이다. 그러나 그림에서 알 수 있는 바와 마찬가지로 浸透층에 대한 영향은 Normal법에 비해 상당히 적음을 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 비저항이 작은 泥水の 존재나 시추공의 크기, 또한 泥水の 地層내 浸

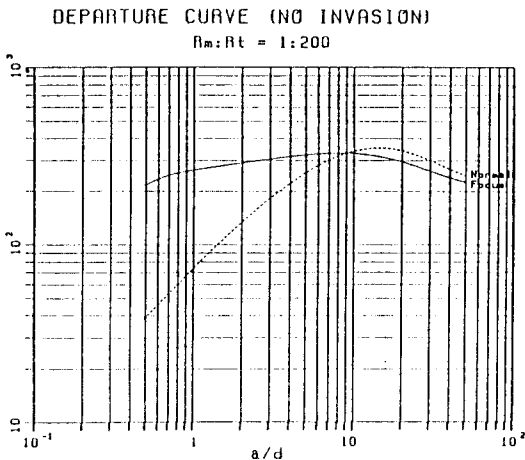


Fig. 2-3 Departure curve for infinite bed thickness

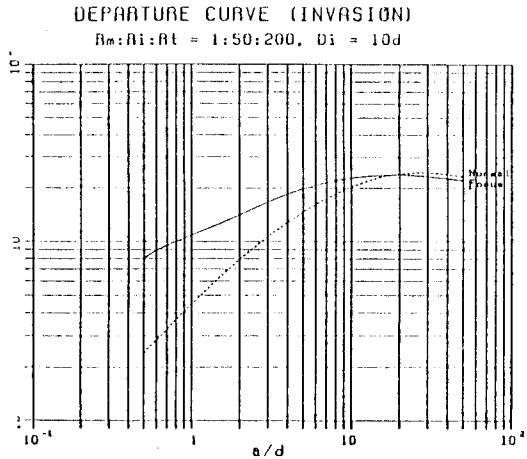


Fig. 2-4 Departure curve for deep invasion

透효과 등을 모두 고려해 볼 때 電流指向法에 의한 綫보기비저항은 Normal법에 의한 綫보기비저항보다 지층의 實際比抵抗에 훨씬 가깝다는 것을 알 수 있으며, 偏差曲線을 이용함으로써 綫보기비저항으로부터 地層의 實際比抵抗을 구하는 검층자료의 해석도 가능해진다.

3. Normal 比抵抗 曲線의 變換

以上에서 살펴본 바와 같이 電流指向法은 3개의 電流電極과 4개의 電位電極을 적절하게 배열함으로써 綫보기比抵抗에 대한 시추공내 泥水에 의한 영향 뿐만 아니라 地層境界에 의한 영향, 泥水の 지층내 침투에 의한 영향들을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 전류지향 綫보기比抵抗은 1개의 電流電極과 1개의 電位電極을 사용했을 때 얻은 電位差들을 일정한 법칙에 따라 調合하고 그에 따른 geometric factor를 考慮함으로써 구할 수 있었다. 이는 電流指向法에 의한 綫보기比抵抗이 Normal법에 의한 綫보기比抵抗보다 지층의 실제比抵抗에 훨씬 가까우며, 電流指向法에 의한 綫보기 比抵抗을 Normal법에 의한 綫보기比抵抗의 變換으로부터 구할 수 있다는 가능성을 제시한다. 물론 電流指向 比抵抗曲線을 지층의 실제比抵抗으로부터 구하지 않고 Normal 比抵抗曲線의 變換에 의하여 구하기 때문에 실제比抵抗을 사용하여 계산한 電流指向 綫보기比抵抗과는 차이가 있으며 따라서 이를 電流指向 近似比抵抗이라 할 수 있다.

이제 전극간격이 a 인 Normal 比抵抗曲線으로부터 電流指向 近似比抵抗曲線을 計算하는 방법을 살펴보고자 한다. Normal법의 전극간격이 a 이므로 電流指向法에 있어서도 모든 전극간격을 a 로 하였을 경우를 우선 考慮한다. 물론 전극간격이 $2a$ 또는 $4a$ 인 Normal 比抵抗曲線도 동시에 考慮할 수 있으며 이에 대해서는 다음 節에서 자세히 설명하겠다.

Fig. 3-1은 전극간격이 a 인 電流指向法에 의한 電流 및 電位電極의 배열과 近似比抵抗계산을 위해 필요한 Normal 比抵抗曲線의 綫보기比抵抗과 比抵抗을 讀取하는 軸점의 위치를 보여준다. 상부 綫보기比抵抗을 計算하기 위해서는 전위 U_M 또는 U_N 이 필요하며 하부 綫보기比抵抗을 計算하기 위해서는 電位 U_M' 또는 U_N' 이 요구된다. 또한 U_M 을 얻기 위해서는 $U_M(O)$, $U_M(A)$ 및 $U_M(A')$ 이 필요하며 U_M' 을 얻기 위해서는 $U_M'(O)$, $U_M'(A)$ 및 $U_M'(A')$ 이 필요하다.

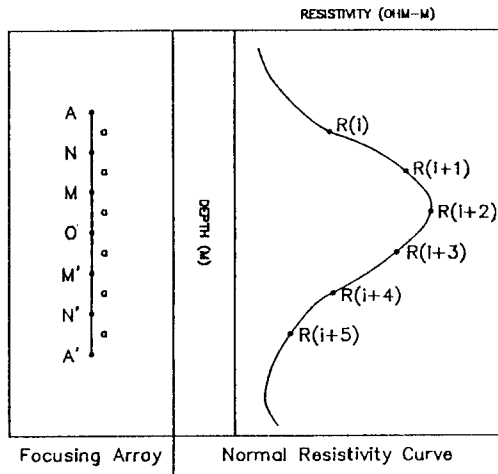


Fig. 3-1 Array of the equal spacing point-electrode focusing device and a normal resistivity curve to be transformed

$U_M(O)$ 와 $U_M'(O)$ 는 Normal 比抵抗曲線의 $R(i+2)$ 와 $R(i+3)$ 으로부터 직접 計算이 가능하며 이는

$$U_M(O) = \frac{I_0}{K_N} R(i+2) \quad (3-1)$$

$$U_M'(O) = \frac{I_0}{K_N} R(i+3)$$

이다. 여기서 $R(i+2)$, $R(i+3)$ 는 깊이 $i+2$, $i+3$ 지점에서의 Normal 綫보기比抵抗이며, K_N

은 Normal법에 따른 geometric factor로서 $K_N = 4\pi a$ 이다.

이와같이 綫보기比抵抗으로부터 電位計算이 직접 가능한 경우는 電流電極과 電位電極 間의 거리가 a 일 때 뿐이며 電極間 거리가 a 가 아닐 때는 평균比抵抗을 이용한 近似計算만이 가능하다. 2層 水平構造에 있어서 上層의 실제比抵抗이 ρ_1 이고 下層의 實際比抵抗이 ρ_2 일 때 Normal법에 의한 地層境界지점의 綫보기比抵抗은

$$\rho_a = 2\left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}\right)^{-1} \quad (3-2)$$

로 얻을 수 있다. 따라서 $U_M(A)$ 를 구하기 위하여 上層의 比抵抗을 $R(i)$, 下層의 比抵抗을 $R(i+1)$ 로 놓고 電極間隔에 의한 geometric factor $2K_N$ 을 고려하면

$$\begin{aligned} U_M(A) &\approx \frac{I_A}{2K_N} \cdot 2\{R(i)^{-1} + R(i+1)^{-1}\}^{-1} \\ &= \frac{I_A}{K_N} \{R(i)^{-1} + R(i+1)^{-1}\}^{-1} \quad (3-3) \\ &= \frac{I_A}{K_N} \bar{R}(AM) \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 $\bar{R}(AM) = \{R(i)^{-1} + R(i+1)^{-1}\}^{-1}$ 이며 전극간격 AM 에 있어서의 Normal 綫보기比抵抗과는 다음과 같은 關係가 성립된다. 즉

$$\rho_a(AM) = 2\bar{R}(AM) \quad (3-4)$$

이 밖에 U_M 및 U_M' 의 計算에 필요한 $U_M(A')$, $U_M'(A)$ 및 $U_M'(A')$ 도 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} U_M(A') &\approx \frac{I_A'}{K_N} \{R(i+2)^{-1} + R(i+3)^{-1} + R(i+4)^{-1} + R(i+5)^{-1}\}^{-1} \\ &= \frac{I_A'}{K_N} \cdot \bar{R}(A'M) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_M'(A) &\approx \frac{I_A}{K_N} \{R(i)^{-1} \\ &+ R(i+1)^{-1} + R(i+2)^{-1} \\ &+ R(i+3)^{-1}\}^{-1} = \frac{I_A}{K_N} \cdot \bar{R}(AM') \quad (3-5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_M'(A') &\approx \frac{I_A'}{K_N} \{R(i+4)^{-1} + R(i+5)^{-1}\}^{-1} \\ &= \frac{I_A'}{K_N} \cdot \bar{R}(A'M') \end{aligned}$$

따라서 中心電極 상부 및 하부의 近似比抵抗은 식 (2-5)와 식(2-8)로부터

$$\rho_a(up) = K_F \cdot \frac{U_M}{I_0}$$

$$= \frac{6}{11} \{ R(i+2) + C \cdot \bar{R}(AM) + C' \cdot \bar{R}(A'M) \}$$

$$\rho_a(dn) = K_F \cdot \frac{U_M'}{I_0} \quad (3-6)$$

$$= \frac{6}{11} \{ R(i+3) + C \cdot \bar{R}(AM') + C' \cdot \bar{R}(A'M') \}$$

을 구할 수 있다.

여기서 C와 C'는 식(2-11)을 사용하여 구하게 되며, 이때

$$P_1 = \frac{1}{a} \{ \bar{R}(AM) - R(i) \}$$

$$P_2 = \frac{1}{a} \{ \bar{R}(A'M) - \bar{R}(A'N) \}$$

$$P_3 = \frac{1}{a} \{ \bar{R}(ON) - R(i+2) \}$$

$$Q_1 = \frac{1}{a} \{ \bar{R}(AM') - \bar{R}(AN') \} \quad (3-7)$$

$$Q_2 = \frac{1}{a} \{ \bar{R}(A'M') - R(i+5) \}$$

$$Q_3 = \frac{1}{a} \{ \bar{R}(ON') - R(i+3) \}$$

이 사용된다. 식(3-7)에서 $R(AM)$, $R(A'M)$, $R(AM')$, $R(A'M')$ 은 식(3-3)과 식(3-5)로부터 구할 수 있으며, 이 밖에

$$\bar{R}(A'N) = \{ R(i+1)^{-1} + R(i+2)^{-1} + R(i+3)^{-1} + R(i+4)^{-1} + R(i+5)^{-1} \}^{-1}$$

$$\bar{R}(ON) = \{ R(i+1)^{-1} + R(i+2)^{-1} \}^{-1}$$

$$\bar{R}(AN') = \{ R(i)^{-1} + R(i+1)^{-1} + R(i+2)^{-1} + R(i+3) + R(i+4)^{-1} \}^{-1}$$

$$\bar{R}(ON') = \{ R(i+3)^{-1} + R(i+4)^{-1} \}^{-1} \quad (3-8)$$

의 관계식을 이용하면 電流比率 C와 C'을 구할 수 있다. 電流比率 C와 C'을 식(3-6)에 代入하여 얻은 상부 및 하부 近似比抵抗으로부터 중앙점의 電流指向 近似比抵抗과 比抵抗비율 및 電流比率를 이용한 地層境界係數를 구할 수 있다. 이때 중앙점의 위치는 i+2와 i+3의 중간점인 O점이 된다.

地層境界係數는 地層의 境界지점에서 나타나는 比抵抗比率와 電流比率의 특성을 이용하여 地層의 境界지점에서 極大값 혹은 極小값을 나타내도록 하여 地層의 境界를 쉽게 구분지을 수 있도록 산출한 것으로서

$$BC = 3RR + CR \quad (3-9)$$

에 의하여 깊이에 따라 표시된다. 일단 地層境界係數 曲線이 얻어지면 이를 전류지향 근사비저항

곡선에 투영하여 극대점과 극소점 중 실제 地層의 境界가 되는 점들을 찾는다.

4. 近似比抵抗法에 의한 解析

4-1. 單一曲線 使用例

Normal檢層曲線이 1개일 경우 近似比抵抗法에 의한 해석을 시도하였다. Fig. 4-1은 현장에서 얻은 電氣比抵抗 및 電氣傳導度에 대한 檢層曲線이다. 本 연구에서는 16" 短 Normal 檢層曲線 중 지하 5,370ft에서 5,420ft 區間이 사용되었으며, 매 16"마다 讀取되어 電流指向 近似比抵抗곡선으로 變換되었다(Fig. 4-2). 電流指向 近似比抵抗曲線에서 Normal曲線의 분석에서는 발견하기 곤란한 比抵抗의 변화를 지하 약 5,408ft에서 발견할 수 있다.

Fig. 4-3은 地層境界係數의 그래프로서 극대점과 극소점에 地層의 境界가 존재하게 된다. Fig.

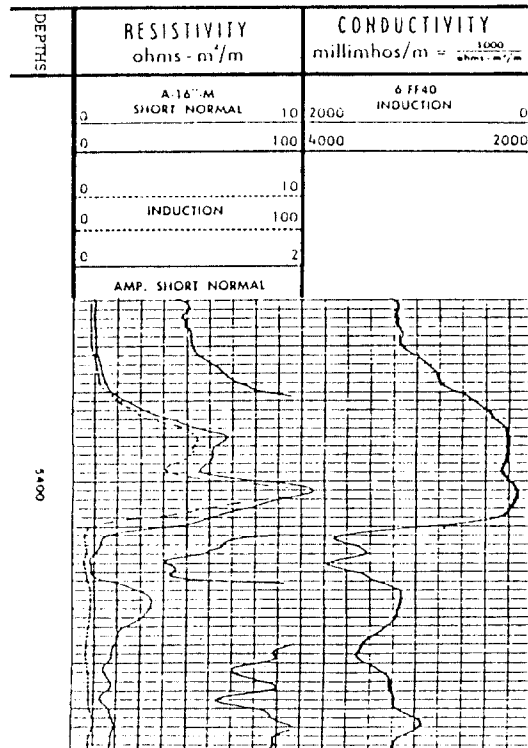


Fig. 4-1 Apparent resistivity data to be transformed

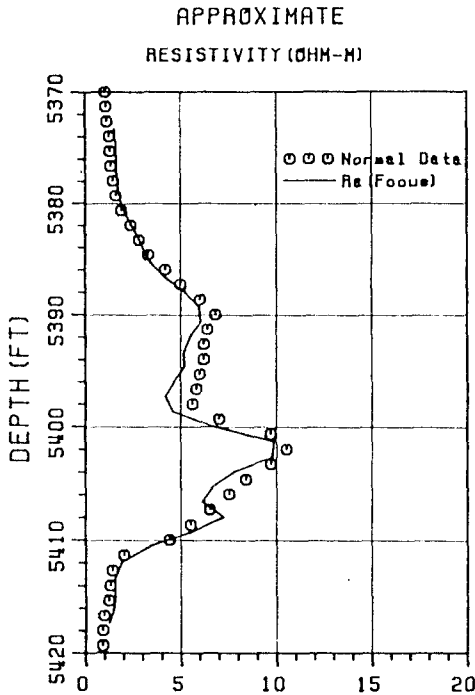


Fig. 4-2 16" normal data and transformed approximate resistivities

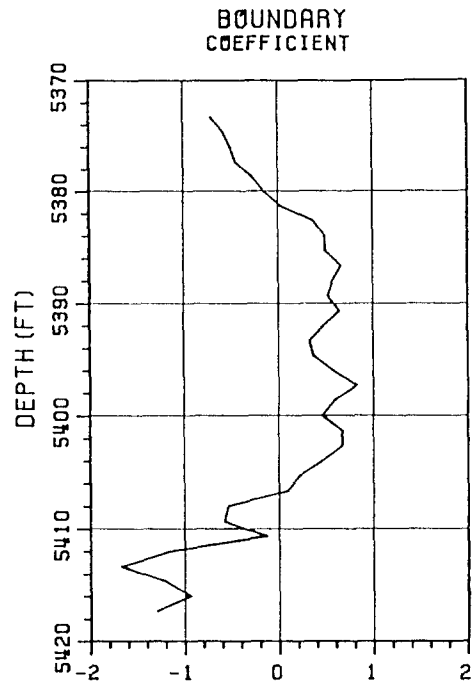


Fig. 4-3 Boundary coefficients

4-3을 Fig. 4-2의 近似比抵抗 曲線에 投影하여 실제 地層의 境界가 되는 극대 및 극소점들을 찾아 이를 圖表化한 것이 Fig. 4-4이다. 이 그림은 곧 Normal 筭보기比抵抗曲線의 해석결과로 볼 수 있으며, 이에 의하면 地層의 수는 10개이고, 각 층의 境界 또는 두께와 各層의 실제比抵抗은 그림에서 보는 바와 같이 推定할 수 있다.

한편 Fig. 4-5는 16" 短 Normal曲線을 線型逆算法에 의하여 해석한 결과(Kim⁶⁾)로서 初期入力 값으로 地層의 수를 7개로 제한하였다. 이때 最終으로 얻은 지층의 모델을 사용하여 계산한 Normal曲線과 실제 Normal曲線과는 8%의 rms 誤差를 나타냈으며, 위로부터 第3層과 第5層은 他層에 비해 그 分解度가 떨어짐을 알 수 있었다. 그러나 本 연구에 의한 解析에 따르면 第3層과 第5층에서 比較的 세밀한 地層의 모델을 얻을 수 있었으며 결과적으로 7層 모델보다는 10層 모델이 實際地層構造에 가까운 모델이라고 생각할 수 있다. 또한 線型逆算法을 퍼스날 컴퓨터에서 實行시킬 때 誤差를 縮소하기 위한 反復計算에 所要되는

시간이 7層 모델에 있어서 數十分 걸리는 데 比較하여 近似比抵抗法은 모델의 地層 수에 상관없이 數秒 이내에 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다.

4-2. 複數曲線 使用例

同· 試推孔 내에서 전극간격을 달리하면서 둘 이상의 Normal 筭보기比抵抗을 측정하였을 경우 Normal曲線의 變換에 의한 近似比抵抗은 電流指向 筭보기比抵抗에 더욱 近接하는 결과를 얻을 수 있다. 例로, 식(2-13)의 $\rho_a(AM)$ 을 구하기 위하여 식(3-3)과 같이 電極間 距離가 a 인 Normal曲線의 $R(i)$ 와 $R(i+1)$ 의 두 筭보기比抵抗을 사용하였다. 그러나 이렇게 해서 구한 平均比抵抗 $\bar{R}(AM)$ 과 $\rho_a(AM)/2$ 과는 그 값에 있어서 차이가 있기 때문에 電流指向 筭보기比抵抗이 아닌 近似比抵抗 밖에는 구할 수가 없었다.

만일 電極間 距離가 $2a$ 인 측정치가 있을 경우에는 $\bar{R}(AM)$ 대신 직접 $\rho_a(AM)/2$ 을 대입함으로써 平均比抵抗 계산에서 오는 誤差를 줄일 수 있다. 이와 같은 이론적 배경을 토대로 식(2-

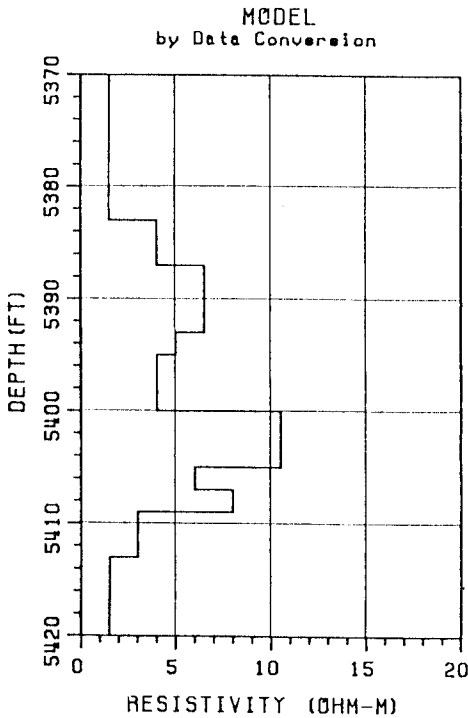


Fig. 4-4 Estimated model obtained by data transform

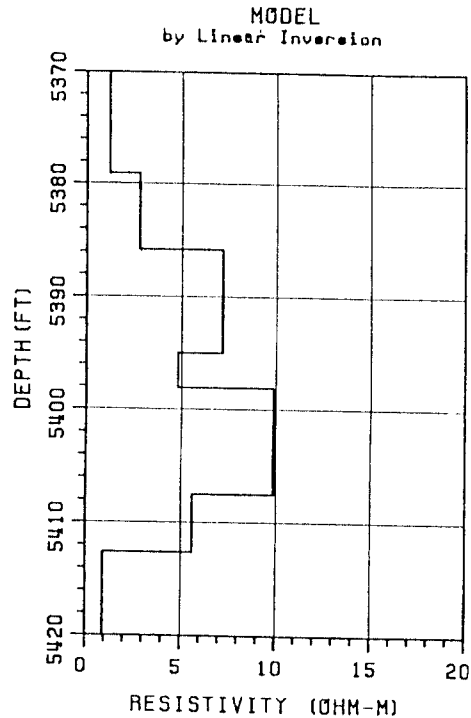


Fig. 4-5 Estimated model obtained by linear inversion

12)에 의한 電流指向 걸보기比抵抗 계산에 필요한 Normal曲線의 종류와 각 曲線에서의 讀取位置 및 사용되는 例는 Table 4-1에서 보는 바와 같다.

현재 metric系에 의해 製作되는 로거는 $a=25$ cm로서 同一 試推孔 내에서 電極間 距離 $2a$ 및

4a에 의한 測定이 가능하게 설계되어 있다. 한편 English系에 의해 製作되는 로거는 $a=16''$ 로서 同一 試推孔 내에서 電極間 距離 4a에 의한 測定이 가능하다.

만일 metric系를 使用할 경우 電極間 距離가 5 a인 Normal 걸보기比抵抗을 測定한다면 平均比

Table 4-1 Reading points for various normal resistivity data and their use

| Used for calculation of | Normal resistivity data | | | | < Remarks > |
|-------------------------|-------------------------|----------------|----------------|-----------------|-------------|
| | Spacing = a | Spacing = $2a$ | Spacing = $4a$ | Spacing = $5a$ | |
| $\rho_a(OM)$ | Center of OM | | | | Eq. (2-12) |
| $\rho_a(OM')$ | Center of OM' | | | | Eq. (2-12) |
| $\rho_a(AN)$ | Center of AN | | | | Eq. (2-11) |
| $\rho_a(A'N')$ | Center of $A'N'$ | | | | Eq. (2-11) |
| $\rho_a(ON)$ | | at M | | | Eq. (2-11) |
| $\rho_a(ON')$ | | at M' | | | Eq. (2-11) |
| $\rho_a(AM)$ | | at N | | | Eq. (2-12) |
| $\rho_a(A'M')$ | | at N' | | | Eq. (2-12) |
| $\rho_a(AM')$ | | | at M | | Eq. (2-12) |
| $\rho_a(A'M)$ | | | at M' | | Eq. (2-12) |
| $\rho_a(AN')$ | | | | Center of OM | Eq. (2-11) |
| $\rho_a(A'N)$ | | | | Center of OM' | Eq. (2-11) |

抵抗 계산은 전혀 필요치 않게 되며 그만큼 해석의 正確度を 높일 수 있을 것으로 사료된다.

5. 結 論

本 論文은 현장에서 얻은 Normal 綫보기比抵抗 曲線을 보다 신속하고 精確하게 解析할 수 있는 自動化된 분석기술을 開發하고자 실시되었으며, 本 研究에서 얻은 結論을 요약하면 다음과 같다.

1) Normal 綫보기比抵抗 計算 方法을 응용하여 任意의 數의 地層으로 구성된 水平多層構造나 圓筒形 多層構造에 있어서 電流指向 綫보기 比抵抗을 計算할 수 있다.

2) Normal 曲線으로부터 讀取한 綫보기比抵抗을 變換함으로써 電流指向 近似比抵抗을 유도할 수 있으며, 또한 地層境界係數를 算出할 수 있어 地층의 實際比저항의 推定 및 地층의 境界를 구분하는데 다른 檢層資料의 도움없이도 가능하게 되었다.

3) 만일 同一 試推孔내에서 Normal 法의 전극 간격을 달리하여 $a=25cm, 50cm, 100cm, 125cm$ 에 의한 測定이 이루어지면 電流指向 近似比抵抗 대신에 電流指向 綫보기比抵抗을 算出할 수 있어서 자료해석의 正確度を 훨씬 더 증진시킬 수 있다.

4) 현재 사용중인 綫型逆算法은 초기모델 入力시 地層의 數와 地層의 境界 및 地層의 比抵抗을 미리 設定해야 하는데 反하여 本 方法은 이러한 과정이 전혀 필요치 않아 分析者의 主觀을 어느정도 排除할 수 있다.

5) 또한 綫型逆算法은 1개 檢層曲線만을 사용하지만 本 方法은 측정된 모든 Normal 比抵抗曲線을 同時에 사용하기 때문에 檢層資料의 활용면에서 있어서 그 効率性을 극대화시킬 수 있다.

6) 퍼스날 컴퓨터를 사용하여 Normal 綫보기 比抵抗 曲線을 變換시킴으로써 현장에서 신속한 資料分析이 가능할 뿐만 아니라 尙後 試推計劃 및 檢層計劃 수립에도 크게 기여할 수 있을 것으로 思料된다.

本 研究은 水平多層構造 및 圓筒形 多層構造 등 1차원 모델을 그 對象으로 하였으며 앞으로 2차원

모델에 대한 研究도 계속 진행되어야 하겠다. 또한 同一 試推孔 內의 다른 檢層資料와의 連繫性을 고려한 綜合的인 解析技法도 講究되어야 하겠다.

後 記

本 論文은 1987年度 文教部 學術研究組成費에 의하여 研究되었음.

參 考 文 獻

- 1) Guyod, Hubert, "Electrical Analogue of Resistivity Logging", Geophysics, Vol. 20, pp. 615-629, 1955
- 2) Dakhnov, V.N., "Quarterly of the Colorado School of Mines", Translated by G.V. Keller, p. 445, 1962
- 3) Daniels, J.J., "Interpretation of Buried Electrode Resistivity Data Using a Layered Earth Model", Geophysics, Vol. 43, pp. 988-1001, 1978
- 4) Yang, F.W. and Ward, S.H., "Inversion of Borehole Normal Resistivity Logs", Geophysics, Vol. 49, pp. 1541-1548, 1984
- 5) Drahos, D., "Electrical Modeling of the Inhomogeneous Invaded Zone", Geophysics, Vol. 49, pp. 1580-1585, 1984
- 6) Kim, J.H., "Forward Modeling and Inversion of Responses for Borehole Normal and Lateral Electrode Arrangements", Ph.D. Thesis, T-3265, Colorado School of Mines, 1986
- 7) Doll, H.G., "The Laterolog: A New Resistivity Logging Method with Electrodes Using an Automatic Focusing System", Petroleum Transactions, AIME, Vol. 192, pp. 305-316, 1951
- 8) Weller, A., "Berechnung Geoelektrischer Potentialfelder mit dem Differenzenverfahren", Freiburger Forschungshefte C405, Leipzig, pp. 68-112, 1986