

이동하면서 측정할 수 있는 시간영역전자탐사 시스템 개발을 위한 센서흔들림유도잡음 제거 연구

황학수* · 이상규*

A Study on Sensor Motion-Induced Noise Reduction for Developing a Moving Transient Electromagnetic System

Hak Soo Hwang* and Sang Kyu Lee*

ABSTRACT : Transient electromagnetic (TEM) method is also affected by cultural and natural electromagnetic (EM) noises, since it uses part of the broadband (10^{-2} to 10^5 Hz) spectrum. Especially, predominant EM noise which affects a moving transmitter-receiver TEM system is sensor motion-induced noise. This noise is caused by the sensor motion in the earth magnetic field. The technique for reducing the sensor motion-induced EM noise presented in this paper is based on Halverson stacking. This Halverson stacking is generally used in a time-domain induced polarisation (IP) system to reject DC offset and linear drift. According to spectrum analysis of the vertical component of sensor motion-induced noise, the frequency range affected by the motion of an EM sensor is less than about 700 Hz in this study. With the decrease of the frequency, the spectral power caused by the motion of a sensor increases. For example, at the frequency of 200 Hz, the spectral power of the sensor motion-induced noise is -90 dBVrms² while the spectral power of the EM noise measured with a fixed sensor on the ground is -105 dBVrms², and at the frequency of 100 Hz, the spectral power of the sensor motion-induced noise is -70 dBVrms² while the spectral power of the EM noise measured with a fixed sensor on the ground is -105 dBVrms². With applying Halverson stacking to an artificial noise transient generated by adding a noise-free transient to sensor motion-induced noise measured without pulsing, it is shown that the filtered transient is nearly consistent with the noise-free transient within a delay time of $0.5 \mu\text{sec}$. The inversion obtained from this filtered transient is in accord with the true model with an error of 5%.

서 론

전도성 광물탐사에 주로 사용된 시간영역 전자탐사 (TEM: Time-domain or Transient ElectroMagnetic) 방법의 활용도는 현재 지질구조 Mapping, 지하수 그리고 환경오염문제까지 그 적용영역을 확대해가고 있다 (이상규 등, 1988; 황학수, 1997a; Buselli, Hwang, 1996; Buselli *et al.*, 1986; Hoekstra, Blohm, 1990; Goldstein, 1990). 특히, 지질구조 mapping, 지하수, 환경오염탐사 등에 대한 전자과탐사의 적용에 있어서, 광범위한 탐사면적에 따르는 탐사비용의 절감과 효율성을 위하여 최근에는 주로 송수신부를 동시에 이동하며 측정하는 시스템들 (향

공전자탐사, Pulled Array Transient ElectroMagnetic)의 사용이 증가하고 있다 (Annan, Lockwood, 1991; Buselli, Williamson, 1996; Duncan *et al.*, 1992; Thompson, 1987).

시간영역 전자과탐사 방법은 광대역 (10^{-2} ~ 10^5 Hz) 스펙트럼을 사용하기 때문에, 인공적인 또는 자연발생적인 전자기 잡음에 영향을 받는다. 이와 같은 인공적, 자연적 전자기잡음들의 특성과 제거방법에 대해서는 많은 논문에서 자세히 언급되어 있다 (황학수, 1997b; 황학수, 이상규, 1997; Buselli *et al.*, 1997a; Buselli, *et al.*, 1997b; Buselli, Cameron, 1996; Halverson, 1982; 1990; Hwang, 1995; Nichols, Morrison, 1988; Wilt *et al.*, 1983; Spies, 1988).

지표 고정 전자탐사의 경우와 달리 송수신부 이동 시간영역 전자탐사에서, 탐사대상체에 대한 전자기 (EM: ElectroMagnetic)반응에 영향을 미치는 주된 전자기잡음 중의 하나는 지자장내에서 수신코일의 움직임에 의해 야기

* 한국자원연구소, 자원탐사연구부 (Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Resources Exploration Division, Taejeon 305-350, Korea)

되는 잡음이다. 이러한 잡음을 본 연구에서는 센서흔들림 유도잡음 (Coil Motion-induced Noise)이라 명명하며, 항공전자탐사에서는 이를microphonic 잡음이라고도 부른다.

항공물리탐사 분야에서 상기한 센서흔들림유도잡음 또는 microphonic잡음을 줄이기 위한 많은 노력이 진행 중이지만 현재까지 좋은 결과가 보고된 사례는 거의 없다. 일례로, 호주에서 개발된 SALTMAP의 경우 송신파형의 기본주기 (2 msec 즉 500 Hz)에 바탕을 둔 중첩방법 (cascade stacking)을 통하여 1000 Hz 이하의 모든 주파수대역의 신호와 잡음을 제거한다 (Duncan, 1996). 현재의 항공전자탐사의 연구추세는 탐사의 가탐심도 증가를 위해 송신신호의 기본주기를 증가하여 후기지연시간의 전자기반응 획득에 집중되어있다. 이와 같은 연구방향에서는 위에 설명된 잡음제거 방법은 기본 송신신호 주기 증가에 제한을 주는 단점으로 작용한다.

본 논문은 광범위한 지역의 천부 지질구조, 환경오염 mapping 등을 위한 시간영역 전자탐사에 있어서 탐사시간과 인원절감 그리고 천부 고분해능을 얻기 위한 기술개발에 관한 연구의 일부이다. 연구내용으로는 수신코일의 움직임에 의해 야기되는 잡음제거를 위해 시간영역 유도분극탐사 (IP: Induced Polarisation) 시스템에 사용되는 Halverson stacking을 적용하였다. 또한, 송신신호 없이 측정된 3성분 전자기파 시계열과 컴퓨터 모델링을 통하여 얻어진 감쇠곡선을 이용하여 시블라이트된 가상 현장자료, 그리고 가상 현장자료의 TEM역산 결과를 통하여 그 효능을 검토하였다.

전자기잡음의 시계열과 스펙트럼 분석

Fig. 1은 송신신호 없이 수신기를 지표에 고정시키고 측정된 전자기잡음의 수직성분 시계열과 그의 파워스펙트럼을 도시한 것이다. 수신기로는 호주 CSIRO에서 개발한 3성분 Roving Vector Receiver (RVR-3C)을 사용하였다. RVR-3C의 수신면적은 성분별로 각각 10000 m²이며 자료 취득시스템의 analogue-to-digital converter (ADC)로는 초당 최대 1M 샘플까지 측정할 수 있는 national instrument의 EISA 2000A를 사용하였는데 자료취득시의 sample rate는 250 kHz 이었다. 시계열에 나타나는 스파이크 형태의 파형은 공중전기 (sferics)에 의한 전자기잡음으로, 이와 같은 고주파수 공중전기에 의해 기여되는 스펙트럴 파워의 주파수영역은 대략 5~50 kHz로 보고되었다 (Hwang, 1995; 황학수, 이상규, 1996). 시계열에서 보이는 배경잡음의 대부분은 44 kHz의 VLF신호이며, 자료취득시스템의 전자적 잡음수준은 125 kHz 이내의 주파수영역

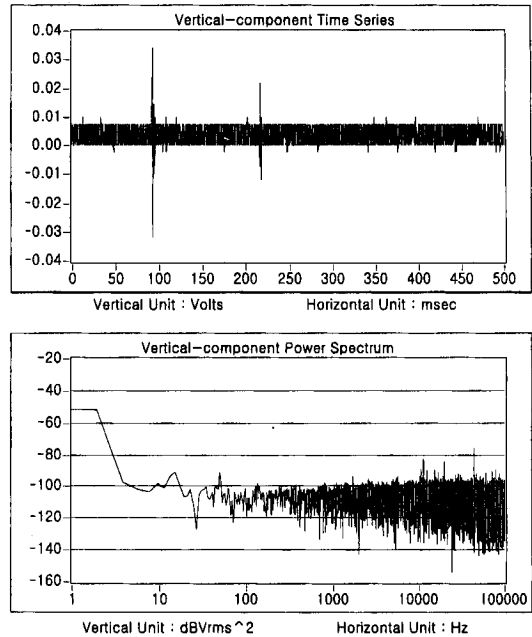


Fig. 1. Vertical-component time series and power spectrum of EM noise measured with a sensor fixed on the ground.

에서 약 -100 dBVrms²이다 (Fig. 1의 하부그림).

Fig. 2는 수신기를 빠른 걸음 (~6 km/hour)으로 이동시키며 측정된 전자기잡음의 수직성분 시계열과 그의 파워스펙트럼을 보인 것인데 저주파수의 센서흔들림유도잡음을 확인할 수 있다. 센서흔들림에 의해 유도된 잡음의 진폭은 대략 ±200 mV로서 Fig. 1의 시계열 (공중전기의 진폭은 ±30 mV)과 비교하여 잡음의 진폭이 약 70배 이상 증가하였다. 고정된 수신센서로 측정된 전자기잡음의 파워스펙트럼 (Fig. 1)과 비교하여 센서흔들림유도잡음에 의해 기여되는 주파수대역은 약 700 Hz이하로 저주파수 대역으로 갈 수록 센서흔들림유도잡음의 스펙트럴 파워는 현저하게 증가한다. 예로서, 200 Hz에서 센서흔들림유도잡음이 있을 경우와 없을 경우의 스펙트럴 에너지는 각각 -90 dBVrms²와 -105 dBVrms²이며, 주파수 100 Hz에서는 각각 -70 dBVrms²와 -105 dBVrms²이다.

Halverson Stacking과 TEM역산

Halverson stacking

주로 halverson stacking은 시간영역 IP (Induced Polarisation)방법에서 측정자료들의 DC offset과 linear drift를 제거하기 위해서 사용되는 신호처리 방법 (King-

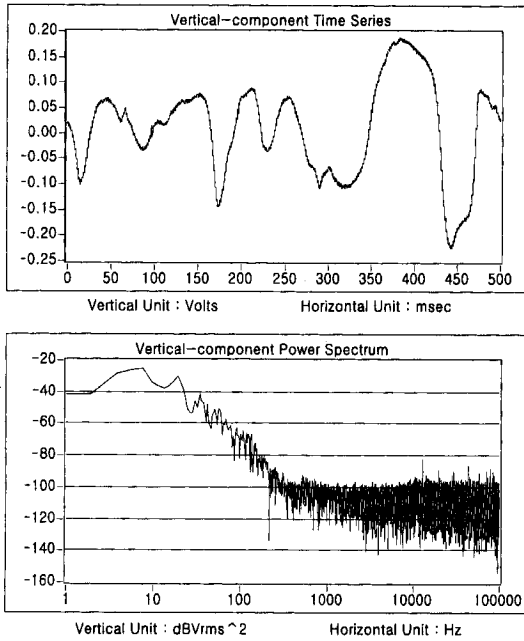


Fig. 2. Vertical-component time series and power spectrum of EM noise measured with a moving sensor.

man, 1995)으로 그 원리는 Fig. 3과 같다. Halverson 알고리즘은 송신신호의 1과 1/2주기에 그 기본 바탕을 두고 linear drift를 추정하는 것이다. 한번의 중합(stack) 필터의 식은 Fig. 3에 나타냈으며, 여기서 T_x 는 송신신호의 주기이며 f_s 는 sample rate이다.

광범위한 천부 지질구조 조사 또는 천부 환경오염조사를 위한 시간영역전자탐사의 경우에는 일반적으로 매우 이른 지연시간대 (예, 수 μsec ~수백 μsec)를 사용한다. 본 연구에서는 이와 같은 지연시간 범위에서는 센서의 흔들림에 의해 야기되는 전자기잡음의 시간적인 변화는 선형이라는 가정을 하였다 (Fig. 4).

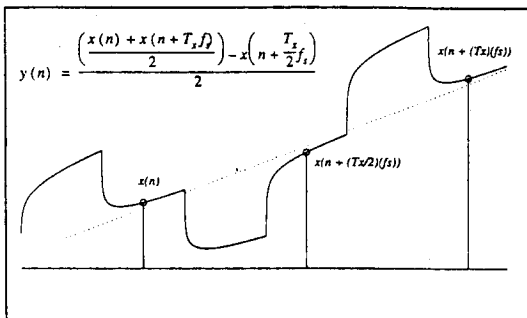


Fig. 3. Illustration of the Halverson stacking filter which removes linear drift.

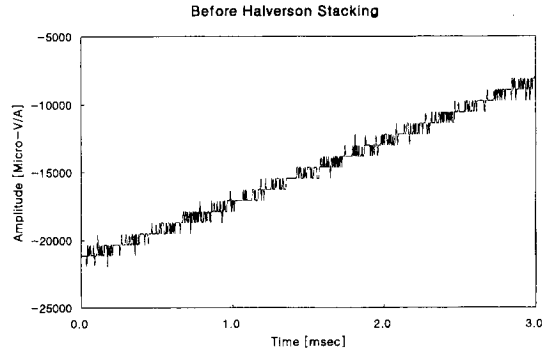


Fig. 4. 3 msec-length time series of sensor motion-induced EM noise.

Fig. 5는 500번의 Halverson stack과 Halverson stack 후 일반적으로 후기 지연시간에서의 자료의 질을 높이기 위해 적용하는 windowing의 결과들을 각각 도시하였다. 여기서 송신신호의 전류가 3 A임을 가정했고 또한 모든 경우에 지연시간은 1 msec까지 측정하는 시스템으로 가정하였다. Fig. 4와 비교하여 센서흔들림에 의해 야기된 저주파수의 잡음 (즉, 본 연구에서는 linear drift로 가정)이 제거됨을 알 수 있다.

TEM역산 결과

Halverson stacking의 성능을 검토하기 위해 사용된 TEM자료는 Grendl (Raiche *et al.*, 1985)을 이용하여 지하 2층구조 모델 500-20-10으로부터 계산되었다. 여기서 500은 첫째층의 비저항을 나타내는 것으로 단위는 Ohm-

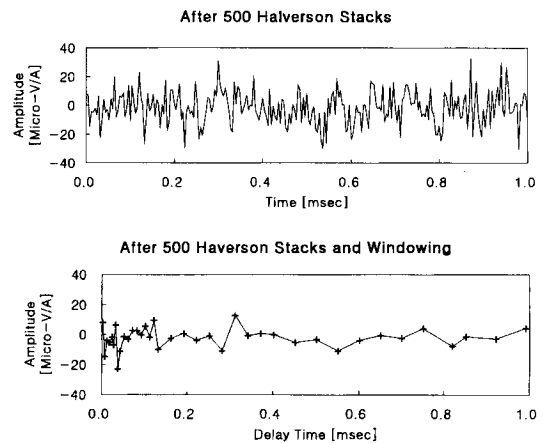


Fig. 5. 1 msec-length time series of sensor motion-induced EM noise after applying 500 Halverson stacks, and after applying 500 Halverson stacks and windowing.

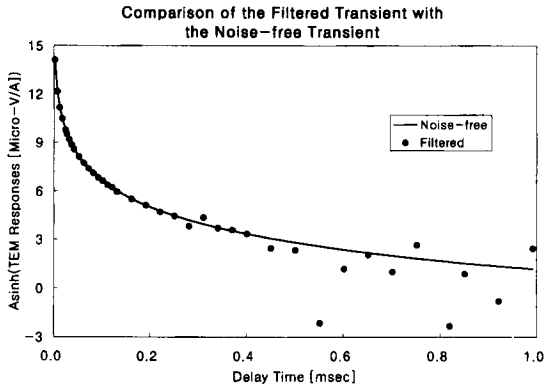


Fig. 6. Comparison of the filtered transient with the noise-free transient.

m이고, 20은 둘째층의 비저항이며, 그리고 10은 첫층의 두께로서 단위는 m이다. 이와 같은 컴퓨터 모델링에 사용된 TEM배열은 in-loop배열로 수신면적은 10000 m², 송신면적을 20 m² 그리고 송신전류는 3 A를 가정하였다.

Fig. 6는 컴퓨터 모델링을 통하여 산출된 잡음이 전혀 없는 (noise-free) 감쇠곡선을 센서흔들림잡음을 함유한 전자잡음 시계열에 500 번의 Halverson stacking과 windowing을 적용하여 얻은 시계열 (Fig. 5)을 더하여 만든 필터된 감쇠곡선을 도시한 것이다. Noise-free 감쇠곡선과 필터된 감쇠곡선들이 500 μ sec내의 지연시간대에서의 서로 일치함을 보였다.

Fig. 7은 Grendl (Raiche *et al.*, 1985)을 이용한 필터된 감쇠곡선에 대한 TEM역산의 예로서 2층구조 역산을 위해 초기모델은 500-500-50 그리고 3층구조 역산을 위한 초기모델은 500-500-500-50-50인 homogeneous half-space를 사용하였다. 초기모델의 비저항을 실제모델의 첫층의 비저항과 같은 500 Ohm-m로 사용한 이유는 김양수 등 (1997)에 의해 보고된 연구결과에 기인하였다. 김양수 등 (1997)의 결과에 의하면 첫 층의 비저항을 알 수 있을 정도의 매우 작은 전류전극 간격에서 측정된 DC의 외견 비저항값으로 첫 층의 비저항값을 고정하고 TEM역산을 수행할 경우 매우 정확한 지하구조에 대한 정보를 얻을 수 있다. 2층구조의 역산결과는 실제모델과의 비교하여 5% 이내의 오차를 갖고 실제모델과 일치함을 보였다. 3층구조의 초기모델이 사용된 경우에도 첫층의 두께와 둘째층의 비저항을 2층구조의 초기모델의 경우와 같이 매우 좋은 분해능을 보였으나, "역산을 통하여 얻어진 모델이 얼마나 잘 필터드자료를 표현하는가?"의 지표가 되는 표준 오차 (standard error) 그리고 "과연 몇개의 층이 최적의 모델인가?"를 나타내는 APRE (Average Predicted

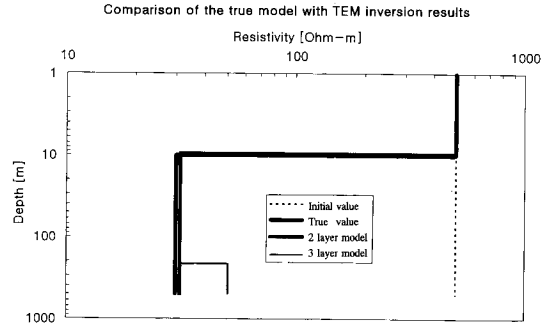


Fig. 7. Comparison of the TEM inversion results obtained with the filtered transient with the true model.

Residual Error) 값들이 가상의 세번째층의 삽입으로 2층구조 역산과 비교하여 증가하였다.

결론

지하자장내에서 수신코일의 흔들림에 의해 야기되는 전자잡음의 수직성분의 주파수 특성을 파악하기 위하여 빠른 걸음으로 수신기를 이동시키며 전자적잡음을 측정하였다. 수신기로는 호주 CSIRO에서 개발한 3성분 Roving Vector Receiver (RVR-3C)을 사용하여 250 kHz로 샘플링하였다.

센서흔들림유도잡음이 영향을 미치는 주파수의 범위는 약 700 Hz이하의 주파수대역으로서 고주파수에서 저주파수로 갈수록 잡음의 스펙트럴 에너지는 증가한다. 예로서, 200 Hz에서 센서흔들림유도잡음이 있을 경우와 없을 경우의 스펙트럴 에너지는 각각 -90 dBVrms²와 -105 dBVrms²이며, 주파수 100 Hz에서는 각각 -70 dBVrms²와 -105 dBVrms²이다.

수신코일의 움직임과 지하자장간의 상호작용에 의해 발생하는 잡음의 제거 방법은 Halverson stacking을 이용하였다. 송신신호 없이 측정된 수직성분 전자기파 시계열과 컴퓨터 모델링을 통하여 얻어진 감쇠곡선을 이용하여 시뮬레이트된 가상 현장자료에 대해 Halverson stacking을 적용하여 얻은 필터된 감쇠곡선은 0.5 msec의 delay time내에서는 이론적 감쇠곡선과 거의 일치함을 보였다. 필터된 감쇠곡선으로부터 역산 결과는 2층구조의 실제모델과 비교하여 5% 이내의 오차범위를 갖고 지하구조를 잘 분해하였다.

참고문헌

김양수, 황학수, 이상규, 황세호, 송무영 (1997) 천부지질구조 조사를 위한 고분해능 시간영역 전자탐사와 직류전기비저항탐사에 관한 모델링. 제69회 한국자원공학회 학술발

- 표회 요약집, 상지대학교, p. 208-214.
- 이상규, 조진동, 구성본 (1988) 해수오염 조사를 위한 TEM soundings의 적용. 지질학회지, v. 24, p. 71-81.
- 황학수, 이상규 (1996) High-frequency Sferics Correlation Measurements and Spectrum Analysis. Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers, v. 33, p. 318-331.
- 황학수 (1997a) Application of geophysical methods to detection of a preferred groundwater flow channel at a Pyrite tailings dam. Econ. Environ. Geol., v. 30, p. 137-142.
- 황학수 (1997b) Remote reference prediction filter in TEM measurements. Journal of the Korean Institute of Mineral and Energy Resources Engineers, v. 34, p. 505-512.
- 황학수, 이상규 (1997) 전기장의 상관측정과 잡음예측필터에 관한 연구. 제69회 한국자원공학회 학술발표회 요약집, 상지대학교, p. 241-247.
- Annan, A.P. and Lockwood, R., 1991, An application of airborne GEOTEM in Australian conditions. Expl. Geophys., v. 22, p. 5-12.
- Buselli, G. and Hwang, H.S. (1996) Electrical and electromagnetic surveys of a mine tailings dam at Brunkang, South Australia. Exploration and mining Report 277F, CSIRO, NSW, Australia.
- Buselli, G., Hwang, H.S. and Pik, P. (1997a) Sferics Elimination. Exploration and mining Report P407, CSIRO, NSW, Australia.
- Buselli, G., Yang, Y.P. and Hwang, H.S. (1997b) TEM profile smoothing with a 50 Hz remote noise prediction filter. Exploration and mining Report 371R, CSIRO, NSW, Australia.
- Buselli, G. and Cameron, M.A. (1996) Robust statistical methods for reducing sferics noise contaminating transient electromagnetic measurements. Geophysics, v. 61, p. 1633-1646.
- Buselli G. and Williamson (1996) Modelling of broadband airborne electromagnetic responses from saline environments. Geophysics, v. 61, p. 1624-1632.
- Buselli, G., Barber, C. and Williamson, D.R. (1986) The mapping of groundwater contamination and soil salinity by electromagnetic methods. Hydrology and Water Resources Symposium, Griffith University, Brisbane, Nov. 1986, p. 317-322.
- Duncan, A.C. (1996) Personal Communication.
- Duncan, A.C., Roberts, G.P., Buselli, G., Pik, J.P., Williamson, D.R., Roocke, P.A., Thorn, R.G. and Anderson, A. (1992) SALTMAP-Airborne EM for environment. Expl. Geophys., v. 23, p. 123-126.
- Goldstein, N.E., Benson, S.M. and Alumbaugh, D. (1990) Saline groundwater plum mapping with electromagnetics. Stanley H. Ward Ed., Geotechnical and environmental geophysics, v. II, SEG, p. 17-26.
- Halverson, M.O. (1990) Real-time telluric cancellation in broadband IP exploration. Flink, J.B., McAlister, E.O., Sternberg, B.K., Wieduwilt, W.G., and Ward, S.H., Eds., Induced polarisation-Applications and case histories. Investigations in Geophysics, v. 4, SEG, p. 199-226.
- Halverson, M.O. (1982) Telluric noise cancellation in induced polarisation prospecting. U.S. patent No. 4339720.
- Hoekstra, P. and Blohm, M.W. (1990) Case histories of time-domain electromagnetic soundings in environmental geophysics. Stanley H. Ward Ed., Geotechnical and environmental geophysics, Vol. II, SEG, p. 1-16.
- Hwang, H.S. (1995) Sferics Noise Minimisation in Transient Electromagnetic Systems using Neural networks. Ph. D. Thesis, Macquarie University, 271p.
- Kingman, J.E.E. (1995) Digital Signal Processing in Electrical Geophysics. CRCAMET, Australia, 73p.
- Nichols, E.A. and Morrison, H.F. (1988) Signals and noise in measurements of low-frequency geomagnetic fields. Journal of Geophysical Research, v. 93, p. 13743-13754.
- Raiche, A.P., Jupp, D.D.B., Rutter, H. and Vozoff, K. (1985) The Joint Use of Coincident Loop Transient Electromagnetic and Schullumberger Sounding to Resolve Layered Structures. Geophysics, v. 50, p. 1618-1627.
- Spies, B.R. (1988) Local noise prediction filtering for central induction transient electromagnetic soundings. Geophysics, v. 53, p. 1068-1079.
- Thompson, S.J. (1987) A new airborne transient EM system. 40th Mtg. Eur. Assn. Expl. Geophys., Abstracts, p. 24.
- Wilt, M., Goldstein, N.E., Stark, M., Haight, J.R. and Morrison, H.F. (1983) Experience with the EM-60 electromagnetic system for geothermal exploration in Nevada. Geophysics, v. 48, p. 1090-1101.