Jour. Korean Inst. Mining Geol.
Vol.21, No.1, p. 85-96, 1988

석탄층 검층자료의 정량적 해석법 연구

권 병두*. 손 세조**. 손 정우**

Quantitative Analysis of Coal Logging Data

Byung Doo Kwon, Se Jo Son and Jeong Woo Son

Abstract : Geophysical well logging at various coal fields were carried out to study the characteristic response of domestic coal seams. Also a computer program is developed for quantitative analysis of coal logging data.

Most coal seams penetrated by the drill holes, where the well logging were carried out, showed poor thickness and quality, and were severely altered. Therefore, majority of log data are inadequate for detailed quantitative analysis. The logs show, however, typical characteristics with related to coal seams, but interpretation should be made with caution because certain log response of demestic coals, mostly anthracite, are quite different to those of foreign coals, mostly bituminous.

The developed comuter program has been proved as an effective one for identification of coal seams and lithology anslysis, and is expected to be succesfully used for coal quality analysis in cases of more diversified log data of good quality being obtained.

서 론

현재 탄전시추는 모두 코어링 시추법을 택하고 있어 시추에 많은 시간을 요할뿐 아니라 심도가 깊어짐에 따라 시추단가가 급격히 상승하고 있는 형편이다. 또한 막대한 량의 코어를 정밀하게 분석하거나 영구 보존하는 데에는 문제가 많기때문에 현재에는 주로 개략적인 주상도 작성과 탄층의 착탄여부 확인 및 샘플채취에만 이용되고 있어 여러가지 비경제적인 요소를 내포하고 있다.

실제로 같은 퇴적분지내에 위치하는 모든 공에 대하여 코어링 시추를 실시한다는 것은 탐사목적이나 경제성을 놓고 볼 때 큰 의미가 없다. 따라서 현재 유전 시추공에서 통상적으로 실시하고 있는 물리검층기술을 탄전시추공에 도입하여 잘 적용할 수 있다면 이러한 문제점을 해결할 수 있을것으로 사료된다.

즉, 석탄층 시추를 논·코어링으로 실시하고 층서구분, 탄층의 판별 및 석탄의 정량적 특성분석을 물리검층 자료를 이용하여 시도한다면 시추시간 및 비용이 절약될뿐만 아니라 분탄층이나 파쇄에 의하여 코어를 제대로 채취할 수 없는 경우에도 특히 유용할 것이다. 또한 시추공 자료로써 검층기록은 객관성을 유지하기때문에 차후의 탐사나 개발에 필요한 기초자료로써 영구 보전할 수 있을것이다.

그러나 우리나라에서는 아직 석탄층에 대한 검층이나 검층자료의 해석에 대한 연구와 경험이 미비하고 검층기술에 대한 인식부족으로 단시일내에 논·코어링시추로 전환한다는 것은 어려울 것으로 생각된다. 최근에 국내 몇개의 유관기관(대한광업진흥공사, 한국동력자원연구소 등)에서 검층기기를 도입하여 부분적으로 운용하고는 있으나 검층법의 종류가 매우 제한되어 있고, 경험있는 검층기술자의 부족으로 말미암아 데이터 획득 및 해석기술에 있어서 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.

그러나 경제적으로나 기술적인 이유때문에 검층의 필요성은 점차 증대되고 있으므로 산학협동으로 체계적인 연구가 요망된다. 선진 외국의 경우, 석탄층 탐사에 물리검층기술을 본격적으로 이용하고 있는데, 예를 들면 한국·알라스카 개발회사에서 개발을 추진하였던 알라스카 탄전에서는 논·코어링 시추에 따른 물리검층을 외국 용역회사에 의뢰하여 실시한 바 있으며, 카나다,

*서울대학교 사범대학 지구과학교육과
**대한광업진흥공사

호주 등에서는 상용적인 탐사과정으로 수행되고 있다. 그러나 상업적인 목적으로 개발된 소프트웨어를 입수하기가 용이하지 않을 뿐아니라, 탄전별 특성이나 사용기기에 따라서도 해석결과에 많은 차이를 나타내므로 독자적인 개발이 필요하다.

본 연구는 검층기술의 자립화를 위한 기초연구로서 우리나라 여러 탄전지역에서 물리검층을 실시하고, 검층곡선상에 나타나는 탄층, 및 주변 암층의 반응 특성을 분석하였으며, 검층자료로부터 암상 및 탄질을 정량적으로 해석 평가하기 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

야외 물리검층

야외 물리검층은 본 연구 수행중 총 20여개 공에 대하여 실시하였으나, 기술적인 문제로 검층에 실패한 경우를 제외하고도 정성적 및/또는 정량적 해석에 사용할 수 있었던 것은 10개공 정도였다.

검층에 사용한 기기는 대한광업진흥공사가 보유하고 있는 Mount Sopris 사 제품(Model 2500)(Fig. 1)으로서 자연전위(SP), 단극전기저항(SPR), 단노말(Short normal)비저항, 자연감마선, 중성자, 밀도 및 온도검층등을 실시할 수 있으나 시추공의 사정 및 기기의 작동상 문제점때문에 모든 종류를 다 측정할 수는 없었다. 물리검층의 일반적인 원리 및 측정방법에 대해서는 기존의 문헌들(권병두, 1980, 권병두외 1983, 민경덕외 1987)에 설명되어 있으므로 생략한다.

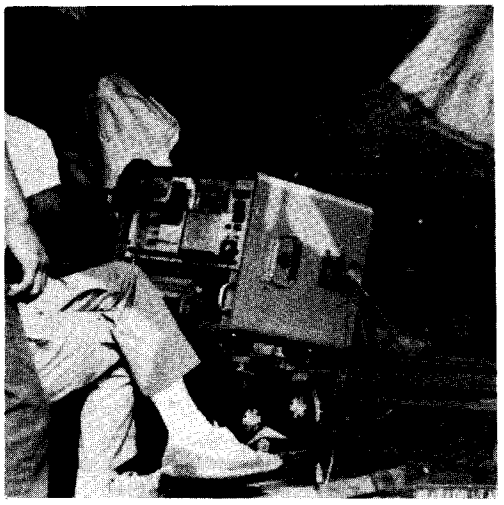


Fig. 1 Mount Sopris Model 2500 logger.

금번 야외조사에서 얻은 검층기록중, 탄층을 판별하는데에 가장 효과적인 것은 밀도검층 자료인것으로 나타났으며, 다른 검층곡선들도 탄층구간에서는 주위 암층에 비하여 경우에 따라서는 특징있는 반응을 보였다. 한편, 우리나라 석탄은 실내연구(서정희외 1979, 권병두, 허식, 1988)에서도 확인된 바와 같이 그 물리적 특성이 외국의 탄(대부분의 경우 Bituminous coal)과는 많은 차이를 가지므로, 외국문헌들(Lavers and Smits, 1981, Reeves, 1981, Renwck, 1981, Hoffman et al., 1982)에 수록되어 있는 검층기록과 비교하여 보면 상당히 다른 반응도 나타난다.

그러나 금번에 검층을 실시한 공들이 모두 탄층의 연장을 확인하기 위한 미탐사지역의 시추공들이기때문에 착맥된 탄폭들이 대부분 수십 cm정도로 얇고, 탄질도 대체로 불량한 편이어서 검층기록상에서 주위의 세일 또는 탄질세일 등과 명확히 구분이 안되는 경우도 많았다.

또한 현재 탄전시추는 주로 코어채취에만 목적을 두어 케이싱이나 이수를 과용함으로써 시추공의 상태가 검층을 실시하기에 부적절한 경우가 많았으며, 금번 사용한 기기에는 캘리퍼검층용 sonde가 없어 공경의 변화를 정확히 알수 없었으므로 검층기록의 정량적 보정이 어려웠다.

따라서 검층자료의 정량적 해석에서는 자료 처리방법, 탄층판별과 암상분석을 위한 소프트웨어 개발 및 이들의 시험적 적용에 대하여 주로 다루었으며, 야외 검층자료의 정성적 해석은 코어주상도와 대비하여 우리나라 탄층의 검층방법별 반응특성을 종합 평가하는데 주안점을 두었다.

금번 실시하였던 물리검층 결과를 종합하여 보면 대부분의 경우에 지층대비가 가능하였고, 퇴적암 지층에서는 입도의 구별과 함께 습곡이나 단층에 의한 층의 반복 또는 역전현상등을 인지할 수 있었다. 그러나 탄질의 추정 및 암석의 변질정도, 규화정도 등을 해석하기에는 아직도 어려운 점이 많다. 이러한 점은 석탄층 검층에 적합한 시추장비를 보강하고, 보다 광범위한 실내 실험결과와 검층결과의 대비 연구를 통하여 지역적 특유의 반응특성에 대한 지식과 경험을 쌓아나감에따라 해결될 수 있을것이다.

검층종류별로 비교적 탄의 특성을 잘 나타내는 경우를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 밀도검층 : 석탄의 밀도는 주위 퇴적암들에 비하여 매우 낮은 값을 가지기때문에 탄층을 판별하고 탄질을 평가하는데에는 밀도검층이 가장 유리한 방법이 될 수 있다. 금번 야외 검층의 결과, 밀도곡선상에 저밀도 이상을 나타내는 구간은 코어상에서 확인되는 탄구간과 비교적 잘 대비되나, 간혹 파쇄대에서도 낮은 밀도를

보이는 경우가 있어 이에대한 확인 및 보정이 필요하다. 따라서 앞으로 공경측정용 캘리퍼 검층기기의 사용이 절실히 요망된다. 외국탄전의 경우, 시추중 탄전의 상하 경계면에서는 파쇄가 잘 일어나나 탄층자체는 별다른 영향을 받지 않는것으로 보고되고 있다. 그러나 우리나라 탄층의 경우, 탄층의 자체에서 붕괴가 잘 일어나기때문에 밀도검층 자료를 정량적으로 해석할때 이에대한 고려가 필요할 것이다.

(2) 감마선 검층 : 순수한 탄의 경우 감마선 방출량이 셰일보다 훨씬 낮기때문에 셰일구간내에 존재하는 탄층을 감마선 곡선상에서 판별하기는 매우 용이하다. 그러나 사암중에 존재하는 경우, 그 차이가 그리 크지 않으므로 다른 검층기록들을 함께 검토하여 종합적인 판단이 필요하다. 한편 셰일함량이 높은 저질탄의 경우, 셰일과 구분하기 힘든 경우가 있으므로 주의가 필요하다.

(3) 중성자 검층 : 탄층의 중성자 반응은 석탄을 구성하고있는 수소원자의 영향때문에 낮은 값을 나타내나 일반적으로 그 수준이 셰일층의 반응의 정도와 유사하므로 뚜렷한 구분이 힘든 경우가 있다. 그러나 사암층 사이에 존재하는 탄층의 경우는 비교적 판별이 용이하다.

(4) 비저항 검층 : 역청탄의 경우, 주위의 셰일층이나 사암층보다는 높은 비저항을 나타내나, 우리나라 무연탄은 매우 낮은 비저항을 나타내므로 사암중에 존재하는 탄층은 비저항검층 곡선상에서 그 구분이 용이하나, 셰일층 또는 탄질 셰일층과는 구분이 명확하지 못한 경우가 많았다. 특히 회분함량이 높은 저질탄의 경우 명확한 판별이 용이하지 않았다.

(5) 자연전위 검층 : 탄층 구간내에 간혹 높은 자연전위 이상을 나타내는 경우가 있는데, 코어상에서 확인된 바로는 이들은 대부분 심한 변질을 받은 경우로 부분적으로 graphite화한 양상을 나타내고 있다.

암상판별 및 탄질분석을 위한 컴퓨터 프로그램 개발

석탄층의 논·코어링 시추에 대비하여 물리검층 자료로부터 층서구분, 탄층의 판별 및 암상과 탄질의 정량적 분석을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 이러한 일련의 과정을 통칭 "Petrophysical analysis"라고 부르며, 본 연구에서는 다음과 같은 단계를 거쳐서 분석을 실시하였다.

(1) 계수화(計數化, Digitization)

(2) 구역분할(Zonation)과 구형화(矩形化, Squaring)

(3) 프로스 풀롯(Cross-plot)

(4) 공극률 및 암상분석(Porosity-Lithology analysis)

탄질분석(Coal quality analysis)

계수화

아날로그 방법으로 기록된 검층곡선을 등간격으로 샘플링하여 컴퓨터 입력데이터를 만드는 작업이다. 최근에는 대부분의 검층 시스템에 디지털기록 장치가 있어 직접 현장에서 측정과 동시에 자기테이프나 디스켓(diskette)등에 데이터를 수록하고 있다. 우리나라에도 디지털 기록장치가 내장된 검층기기의 도입이 시도되고 있으므로 빠른 시일내에 계수화(digitization)의 자동화가 이루어질 수 있을것이다.

구역분할과 구형화

구역분할(Zonation)이란 검층기록상에 나타나는 반응특성을 분석하여 암상의 변화를 확인하고 이들의 경계를 구분하는 작업이며, 구형화(矩形化)는 이들 경계사이에 위치하는 구간별 암상을 대표할 수 있는 값을 통계적 방법을 통하여 결정함으로써 일반적으로 복잡한 양상을 보이는 검층곡선을 사각형 계단모양의 기록으로 단순화시키는 작업이다. 이 과정은 잡음의 영향을 줄일 수 있고, 미세한 암상의 변화를 무시하여 구간별로 정량적 해석을 실시함으로써 계산시간을 절약할 수 있다.

석탄층 검층자료로는 밀도와 감마선 검층자료등이 주변의 퇴적암과 탄층을 구분하기 위한 구역분할을 실시하는데 가장 유용한 것으로 생각된다.

물리검층곡선의 구역분할을 위한 여러 방법들이 연구되어 왔으나 (Hawkins and Merriam, 1975, Show and Cubitt, 1978), 크게 통계적인 방법과 비통계학적 방법으로 구분할 수 있다. 먼저 파라미터 통계에 근거한 방법들(Hawkin and Merriam, 1973, 1974)은 분할구역내의 자료가 어느정도 균질한 정상분포의 성질을 가져야 하는데, 이런 조건들은 지질학적 검층자료에는 적합하지 않은 경우도 많으므로 이런 가정들을 필요로 하지 않은 비파라미터(non-parametric) 통계방법인 K-test를 이용한 방법(Levine et al., 1981)이 개발되었다. 그러나 이상의 방법들은 자료속에 포함되어 있는 잡음(noise)성분에는 강하다는 장점은 있으나 너무 통계학적인 기준에 의존되어 있어 데이터 처리 및 분석에 시간이 많이 걸리는 편이며, 비 현실적인 결과를 얻는 경우도 많다. 금번 석탄층 검층자료 해석시 가장 많이 이용되는 밀도 검층곡선의 경우, 잡음의 영향이 비교적 적은 편이므로 이들 방법의 적용은 그리 효율적이지 못하다.

본 연구에서는 비통계적 방법의 하나인 "수치미분"을 이용한 방법(Kulinkovich et al., 1966)을 수정하여 사용하였다. 이 방법은 검층곡선상에서 미분치가 크게 나오는 점을 경계로 택하여 구역분할을 실시하는 것으로, 이론이 간단하고 계산시간이 적게드는 장점이 있으나 잡음에 너무 민감하기때문에 거의 사용되지 않았으나, 최근 Griffith(1982)등이 연속길이(run-length)를 조절하거나 미분치의 한계값등을 정하는등 몇가지 개선점을 추가하여 그 효용성을 증진시킨 바 있다. 여기서는 Griffith(1982)가 사용한 방법에 곡선의 기울기가 대체로 일정한 PSV(Persistent slope variation)구역 처리시의 "허용미분치", 기울기의 변화가 심한 NSV(Noisy slope variation)구역 처리시의 "허용잡음치"에 대한 조건을 새로히 설정하여 추가함으로써 구역분할의 정확성을 높일 수 있도록 하였다.

본 방법에서 분할구역의 결정을 좌우하는 주요 파라미터는 다음과 같다.

연속길이(run-length) : 암상의 변화에 따른 검층반응을 잡음에 의한것과 구별 짓게하는 길이, 즉 근사미분치가 일관성을 가지며 변하는 검층반응의 최소자료수. 본 연구에서는 근사미분치(slope)가 연속길이 이상으로 일관성있는 변화를 보이는 구역을 PSV구역으로, 그 이하의 일관성없는 변화의 구역을 NSV구역으로 정하였다.

허용미분치 a_{tol} : PSV구역내에서의 잡음처리와, 거의 변화를 보이지 않는 CV(nearly constant variation) 구역을 감지하기 위한 값.

허용잡음치 $\triangle V_{tol}$: NSV구역내의 분할을 위한 값.

이상의 파라미터 값을 이용한 구역분할의 기준은 다음과 같다.

(i) 근사미분치가 a_{tol}보다 크면서 연속길이 이상 일정한 부호를 가질때, 이 PSV구역안에서 최대 미분치가 나타나는 곳을 경계로 정한다.

(ii)경계의 전과 후의 값은 PSV구역 바깥에서 처리되어 정해진 값으로 결정한다.

(iii) a_{tol}이하의 수치미분값이 계속되는 부분은 CV구역, 즉 하나의 층으로 정한다.

(iv) 위의 (i), (iii)의 조건을 만족하지 않는 잡음구역은 상수함수로 회귀시켜 그 오차범위가 $\triangle V_{tol}$인 구역들로 분할한다.

크로스 플롯

각각의 검층자료를 독립적으로 해석하는것 보다 두가지 이상의 여러 검층자료를 상호 관련시켜 비교 분석하면 보다 유용한 정보를 얻을 수 있다. 크로스 플롯을 이용한 검층자료 상호간의 정량적 비교로부터 지층의 암상구분 및 공극률, 공극내 함유유체의 특성을 해석하는데 필요한 파라미터를 결정할수 있다. 금번 개발한 컴퓨터 프로그램은 크로스 플롯상에서 구역별로 빈도수를 나타내어 주므로, 분포 패턴에 대한 육안적 검토와 더불어 정량적 분석시에도 유용하다.

크로스 플롯 결과의 해석은 주로 수학적 모델을 이용하거나, 경험에 의한 판단이 주요한 작용을 하는데, 이때 그 지역의 지질학적 특성에 대한 많은 지식이 필요하다. 석탄층 검층자료의 경우, 밀도-중성자 크로스 플롯으로부터 탄의 종류에 대한 정보를 얻거나 (Lavers and Smiths, 1981), 밀도-단노말 비저항 크로스 플롯등은 석탄의 탄화도(rank)를 결정하는데 기본적 자료로 이용되기도 한다(Reeves, 1971, 1981). 또한 다음 단계에서 수행하게될 공극률 및 암상 해석이나, 탄질 분석등에 사용될 특정 성분의 검층반응의 기여도, 즉 파라미터의 계수를 정할 때 꼭 필요하다.

공극률 및 암상분석

본 단계는 검층자료의 정량적 분석을 위한 최종 단계로서 여러가지 검층자료에 기록되어 있는 각종 반응특성에 대한 이론적 관계식을 가정하고, 이들 방정식을 풀어 탄층과 주변 지층의 암상구분이나 탄질에 대한 정량적 수치를 구하게 된다.

(i) 이론적 배경

검층반응과 그것에 영향을 주는 성분사이의 관계식을 검층반응 방정식이라 하는데 일반적으로 다음과 같이 나타날 수 있다.

$$b_i=\sum_{j=1}^{n} a_{ij}(f_v)_j,\ i=1,\ 2,\ldots,m \qquad (1)$$

여기서는 b_i는 i번째 기록의 검층반응(측정치)

n은 성분의 수

a_{ij}는 i번째 기록의 j번째 성분의 반응계수

$(f_v)_j$는 j번째 성분의 부피함량(volume fraction)

m은 반응방정식의 수

를 나타낸다. 이때 편의상 단위방정식을 m번째 포함시켰으며, 이경우 $b_m=1.0$, $a_{mj}=1.0$ (j=1, 2, .., n)이 된다.

식(1)을 행렬식의 형태로 표시하면

$$\mathbf{b}=\mathbf{A}\mathbf{f}_v \qquad (2)$$

여기서 $\mathbf{b}=|b_1, b_2\ldots, b_m|$, $f_v=|(f_v)_1, (f_v)_2, .., (f_v)_n|$ A는 원소 a_{ij}(i=1, 2, ..., m; j=1, 2, ..., n)로 구성되

는 mxn 행렬이다. 이때 m=n 가 되어 A가 정방행렬이고 'nonsingular'이면 단일해가 존재하며

$$f_v=A^{-1}\,b \qquad (3)$$

로 구할 수 있다. 한편 각 구성 비율은 0보다 커야만 하므로, 다음의 조건

$$(f_v)_j>0 \ (j=1,\ 2,\ \ldots,\ n) \qquad (4)$$

을 만족하여야 한다.

그러나 실제 야외검층 자료 분석의 경우, 암상, 공극률, 함유 유체의 종류등 많은 자연적인 요소들의 변화를 고려해야 하므로 주어진 방정식의 수보다 변수, 즉 구성 성분의 수가 많은 것이 보통이며, 이때에는 무한히 많은 해가 존재하게 된다. 또한 구한 해가 (4)의 조건을 위배하는 경우도 종종 나타난다.

이런 문제점들을 해결하기 위하여 여러 방법들이 시도 되었으나 (Burke et al., 1967, Harris와 McCammon, 1971), 그중 가장 효율적인 것으로 알려져 있는 몇가지 방법을 택하여 그 결과를 비교 검토하고 석탄층 검층자료를 해석하는데 가장 적합한 프로그램을 개발하고자 하였다.

(ⅱ) Burke의 방법

식(1)에서 n>m일때 발생하는 해의 비유일성(nonuniquenss)을 없애기 위하여 Burke등 (1967)은 n-m개의 성분을 적당히 선택하여 다음과 같은 n-m개의 항등식을 첨가시켜 nxn방정식으로 만들었다.

$$(f_v)_s=1.0(f_v)_s+\sum_{j\neq S} 0.0(f_v)_j,\ s=1,\ 2,\ \ldots,^{n-m}$$

여기서 $(f_v)_s$는 선택된 성분(s)의 함량비율을 나타낸다. 처음에는 선택된 성분의 비율을 0으로부터 시작하여 적당한 양을 더해가며 방정식을 풀어(4)의 조건을 만족하는 해가 나올때까지 계속한다.

(ⅲ) 최대 엔트로피 근사방법

식(1)의 m개의 주어진 방정식에 (4)의 조건을 가하면, 해는 즉, 각 성분비율은 상대적인 범위로 나타난다. 이때 불확실성을 최소로하는 안정된 해를 구하기 위하여 다음의 엔트로피 함수 H를 최대로 만드는 해를 구하면 된다.

$$H=-\frac{100}{l_n(n)}\sum_{j=1}^{n}(f_v)_j\,l_n(f_v)_j \qquad (5)$$

여기서 n은 성분의 수 $(f_v)_j$는 j번째 성분의 부피함량이다.

(ⅳ) 최소 엔트로피 근사방법

검층반응식을 이용하여 실제로 암상분석을 실시하는 경우, 식(4)의 조건외에도 여러가지 다른 필요한 조건들이 있으며, 그중 중요한 몇가지는 다음과 같다. 첫째, 대부분의 암석에 있어서 공극은 석기(matrix)의 부피보다 적으므로, 공극률 Φ는

$$\Phi<0.5 \qquad (6)$$

를 만족해야 한다. 둘째, 퇴적지층에서는 심도에따라 암상이 변화할 때 각 심도에서는 특별히 우세한 암석형만 뚜렷하게 나타나는 경향이 있다. 즉 가장 우세한 암석성분의 비율$(f_v)_j$는 다른 암석 성분의 비율$(f_v)_i$(i=1, 2, ..., n; i≠j)에 비하여 현저히 큰 값을 나타낸다.

$$(f_v)_j\geq\sum_{\substack{i=1\\ i\neq j}}^{n}(f_v)i \qquad (7)$$

(6)과 (7)의 조건을 만족하는 해는 성분비율의 값이 가능한 편재되어 있게 하는, 즉 식(5)의 엔트로피 함수의 값을 최소로 하는 것이다. 이때의 해는 원래 범위의 경계에 존재하는 좀 불안정하기는 하나, 실제로는 최대 엔트로피 근사보다는 적은 예상오차를 낸다고 알려져 있다.

(ⅴ) 최소 분산 근사방법

엔트로피 함수 대신에 분산함수

$$V=\frac{100n}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(f_v)_j\,[1-(f_v)_j] \qquad (8)$$

를 사용하여도 비슷한 결과를 얻을 수 있으며, 일반적으로 최소분산 방법이 (6), (7)의 조건을 더 잘 만족한다.

(ⅵ) 예비실험

상기의 방법들 중 Burke의 방법과 최소 분산 근사방법을 택하여 그 효용성을 검토하기 위한 예비실험을 실시하였다. 탄층에 적용하기에 앞서 이론적으로는 동일하게 적용할 수 있는 유정 검층자료(Fig. 2)를 택하여 암상분석을 실시하여 보았다. 검층자료 및 입력 파라미터들은 Mosa(1986)의 논문으로부터 취하여 금번 개발한 프로그램의 결과들을 원 논문의 결과와 비교하여 검토하였다.

검층반응 방정식은 아래와 같다.

$b_s=186.0\Phi+42.0D+50.0A+50.0P+53.0G+55.0S$
$b_D=1.112\Phi+2.84D+2.98A+2.19P+2.35G+2.65S$
$b_G=0.0\Phi+0.0D+0.0A+143.0P+0.0G+0.0S$
$1.0=1.0\Phi+1.0D+1.0A+1.0P+1.0G+1.0S$

여기서 b_s는 음파검층곡선의 주행시간($\triangle t$) 측정치, b_D는 밀도검층의 밀도측정치, b_G는 감마선 검층의 측정치이고, Φ는 공극률은 나타낸다. 또한 D는 돌로마이트, A는 경석고, P는 셰일, G는 석고, S는 사암의 함량비를 각각 나타낸다.

(1) 일반화 시킨 Burke의 방법

위의 4개의 검층 방정식에다 석고(gypsum)와 사암(sand)의 인자를 선택하여 다음과 같은 2개의 항등식을 첨가하였다.

$1.0G=0.0\Phi+0.0D+0.0A+0.0P+1.0G+0.0S$
$1.0S=0.0\Phi+0.0D+0.0A+0.0P+0.0G+1.0S$

처음엔 G, S 모두 0으로 두고 푼 다음 해가 (4)의 조건을 만족하면 그해를 취했고, 만족하지 않을때에는 G를 일정량만큼 계속 더 해나가면서 해를 구하여 (4)의 조건이 만족할 때까지 한계량까지 행하였다. 이래도 해가 나오지 않을 때에는 S를 선택하여 똑같이 수행하였고, 그래도 만족하는 해가 나오지 않은 경우는 해가 없는 것으로 처리하였다. 이때 한계량은 0.3으로, 증가량은 0.01로 하였다. 그 결과는 Fig. 2에 표시되어 있다.

(2) 최소 분산 근사방법

이 방법에 의한 해는 전체 해 집합이 이루는 "Convex set" 꼭지점에 그 해가 존재하므로, 이 해는 적어도 (n-m)개의 $(f_v)_j$가 0인 값을 가진다. 즉 원식의 전체 6개중 3개의 성분을 계속적으로 골라 "nonsigular"인 경우만 풀어서 이 해중(4)의 조건을 만족하는 해가 하나도 나오지 않을 때에는 해가 없는것으로 처리하였다. 이 결과도 Fig. 2에 함께 표시되어 있다.

(3) 결과 비교

두 방법을 적용한 결과는 커다란 차이점을 보이지 않으나, 최소 분산법의 경우 그 해의 특성답게 곳곳에 약간의 이질적인 층이 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나 (4)의 조건을 만족하지 않은 경우에 대한 처리는 두 결과에서 비슷하게 나타났다. 실제로 일반적 Burke의 방법은 최소 분산법을 간편하게 축소시킨 형과 같은 의미를 내포하고 있음을 알 수 있다. 계산시간은 최소분산 방법보다 조금 적게 걸리는 것으로 나타났다.

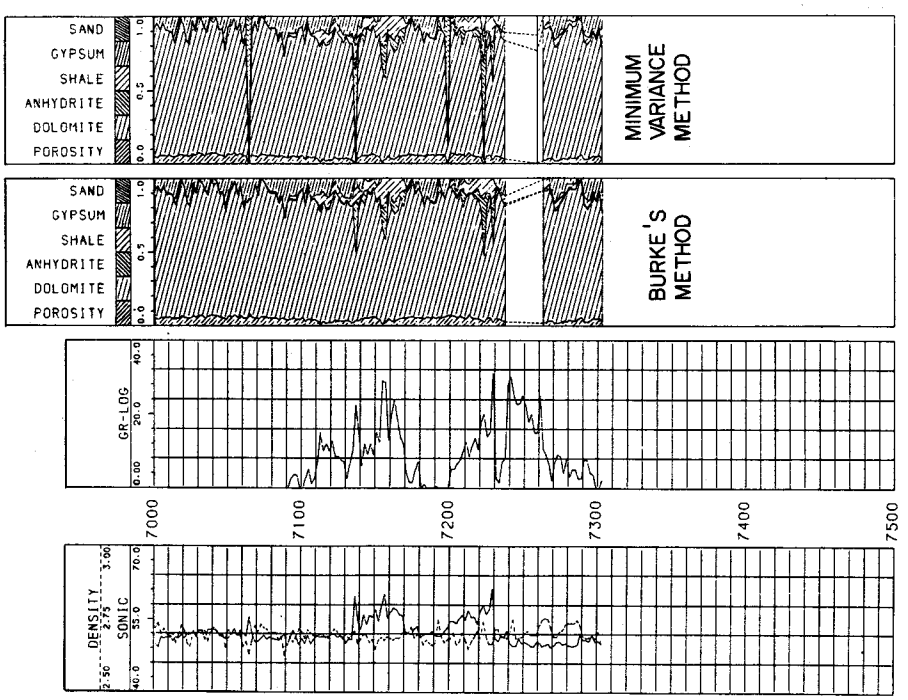


Fig. 2 Computed lithology analysis of oil well logging data.

탄질분석

앞의 경우에서 지층의 각종 암상에 대신하여 탄의 성분, 즉 고정탄소분, 휘발성물질, 수분, 광물질, 회분등 각 성분의 함량에 대한 분석을 실시하여 입력 파라미터로써 사용할 수 있다면 그 결과는 석탄의 질(rank)에 대한 정량적 정보를 제공하게 될 것이다. 즉 고정탄소분(C), 휘발성물질(V), 수분(M), 광물질(P), 회분(A)에 대한 각 함량비를 t, w, x, y, z라 하면 이들의 합은 1.0이 되고, 앞에서와 같이 방법으로 여러 검층곡선에 대한 반응방정식을 세울 수 있을것이다. 이때 사용하는 검층자료의 종류나 수에 따라 위에서 정한 파라미터 중 고정탄소분과 휘발성 물질을 합하여 coal로 두거나 광물질은 회분에 포함시킴으로써 반응방정식을 간편화 할 수도 있다.

석탄층 검층자료에의 적용 예

Bering Alaska 지역의 검층자료 분석

금번 개발한 컴퓨터 프로그램을 탄전지역의 검층자료에 적용하여 보기위하여 한국·알라스카 개발 주식회사가 1984년도에 미국 알라스카주 Bering River 탄전에서 실시한 검층자료를 사용하여 그 결과를 검토하였다. 탄전지역의 지질은 제3기 퇴적암(함탄셰일, 사암층)과 소규모의 제4기 지층 및 화성암류가 분포되어 있으며, 탄의 종류는 역청탄이다.

탐사시추는 몇개의 공에서만 코어링 시추로써 실시하고 대부분 논·코어링으로서 실시하였으며, 모든 공에 대하여 물리검층을 실시하였다. 검층의 종류는 캘리퍼, 감마선, 밀도, 중성자, 지향식 비저항 검층과 경사검층등이다. 암상구분을 위한 정량적 해석은 미국 BPB사에서 실시 하였으며, 감마선, 밀도 및 캘리퍼 검층자료를 기본자료로 이용하였다. 탄질분석은 현재까지 보고된 바 없으나, 탄 시료의 화학분석 결과가 불충분하고 검층기록들도 완벽한 상태가 아니기때문에 그리 용이하지는 않을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 Bering River 탄전 검층기록 중 밀도 및 감마선 검층자료를 암상분석을 위한 기본자료로 하고, 캘리퍼 감층곡선은 공벽 붕괴(caving)판별을 위한 참고 자료로 사용하였다. 이에 대응하는 암상의 성분은 석기, 셰일. 공극률을 택하였으며, 검층반응방정식은 아래와 같이 사용하였다.

$$b_D = 2.58(f_v)m + 2.55(f_v)sh + 1.0(f_v)\Phi$$
$$b_G = 35.0(f_v)m + 160.0(f_v)sh + 0.0(f_v)\Phi$$
$$1.0 = (f_v)m + (f_v)sh + (f_v)\Phi$$

여기서 b_D, b_G는 각각 밀도와 감마선 검층 측정치이며, $(f_v)m$, $(f_v)sh$, $(f_v)\Phi$는 각각 석기, 셰일 및 공극이 암석내에서 차지하는 부피비율(volume fraction)이다, 위의 식에서 검층별 각 성분의 반응계수 들은 BPB가 결정한 값을 그대로 사용하였으며, 수포화율 100%로 가정하였을때 밀도검층과 감마선 검층에 대한 공극률의 반응계수를 각가 1.0, 0으로 취하였다.

위의 방정식에서 미지변수의 갯수와 방정식의 갯수가 같으므로 해는 쉽게 구할 수 있으나, 구한 해, 즉 각 성분의 부피비율이 음의 값을 가지거나 공극률이 0.5 이상이 되는 등 비 실제적인 값을 얻는 경우가 나타날 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 검층반응에 영향을 미치는 많은 자연적인 요소들을 적은 수의 성분으로 한정시켰기 때문이다. 이의 해결을 위하여 주어진 검층반응치가 기 선택한 성분들만의 복합적 구성으로 나타날 수 없음이 예견되는 곳, 즉 해가 존재하지 않는 구간은 특정한 검층반응에 의거하여 직접 암상 또는 공내사정으로 규정하여 버린다. 여기서는 캘리퍼 측정치가 5.0(in) 이상이 되어 검층반응치가 신빙성이 없는 곳은 caving으로 처리하였고, 밀도검층치가 2.0(g /㎤) 이하인 곳은 바로 석탄으로 결정하였으며, 그외의 곳은 검층반응식을 이용하여 정량적 암상분석을 실시하였다.

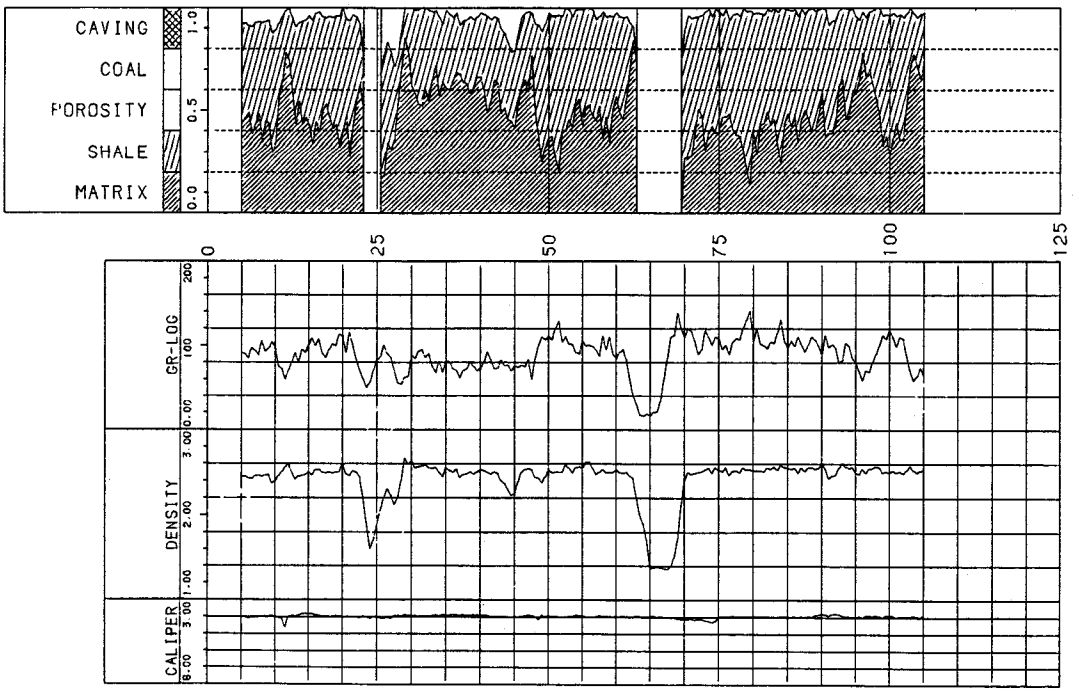
Fig. 3(a)는 일반화시킨 Burke의 방법을 사용하여 버링탄전 K-84-4R 시추공의 물리검층자료에 대하여 실시한 암상분석 결과이다. 이 결과는 BPB 사가 실시한 해석결과와 거의 유사하다. Fig. 3(b)는 검층자료의 구역분할과 구형화한 결과 및 구형화한 검층기록에 대하여 실시한 암상분석 결과를 보여준다. 구역분할을 하기위하여 사용한 입력 파라미터는 Table 1에 표시하였으며, 잡음이 많은 감마선 검층치는 잡음에 비교적 적은 밀도검층치에 비해서 허용치를 크게 잡았다.

Fig. 3(c)는 탄질물(Coaly mineral)을 추가하여 모두 4개의 성분을 분석한 결과이다. 탄질물의 밀도 반응치(계수)는 2.0(g /㎤)으로 취하였으며 감마선 반응치(계수)는 대략 70(cps)으로 취하였다. 이때 재구성된 검층반응 방정식은 해가 무한히 많이 존재하므로 Burke방법보다 인위적인 가정이 비교적 적은 최소분산근사법(Minimum variance method; MVM)을 사용하였다. 그림에서 살펴보면 곳곳에 탄질물이 나타나며, MVM의 특징인 성분값의 편재현상도 볼 수 있다.

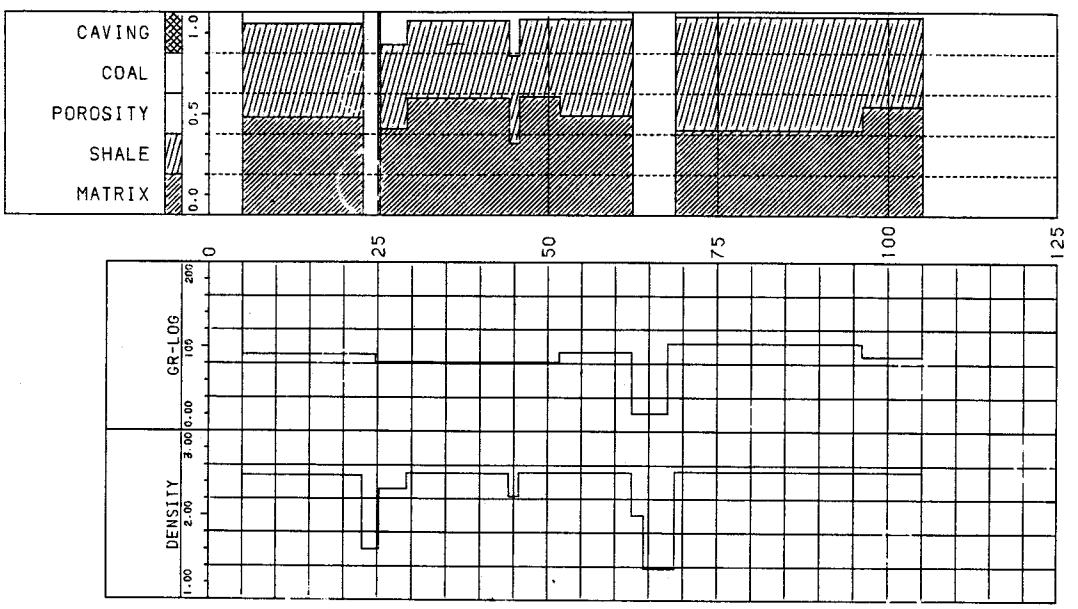
보은 탄전지역의 검층자료 분석

보은, 문경, 삼척 등 국내 탄전지역의 검층자료에 대하여 암상분석을 실시 하였으나, 여기서는 보은탄전 149호공(Fig. 4)자료의 분석 결과만을 예시하였다. 암

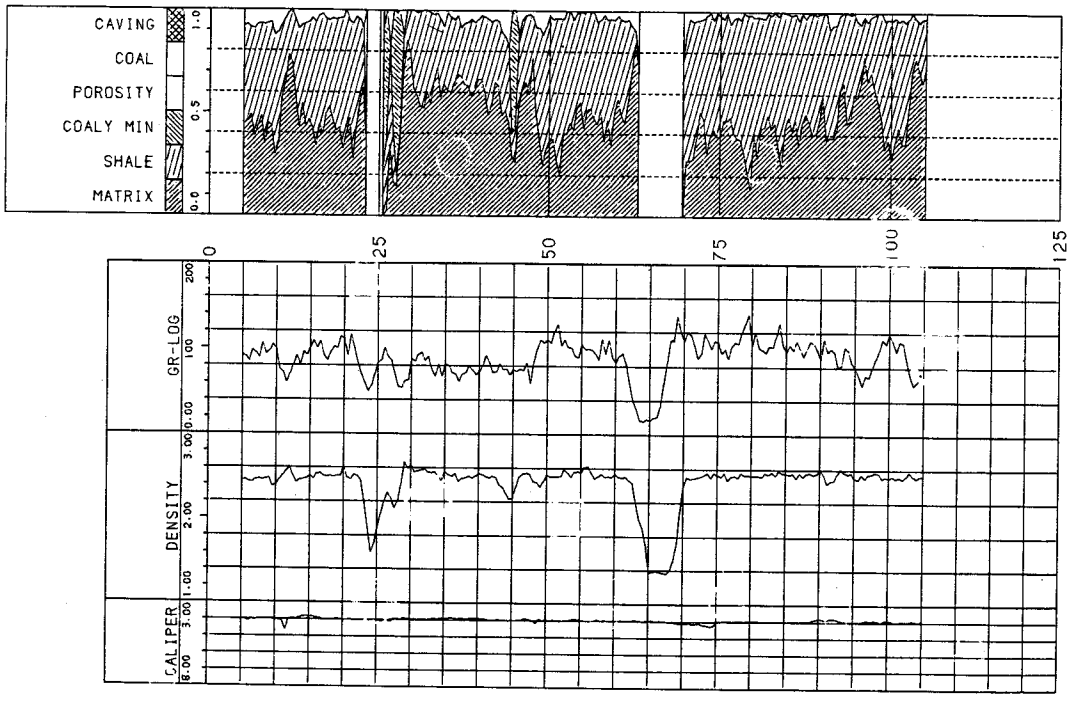
Fig. 3 Computed lithology analysis of geolophysical logs from the borehole K-84-4 R Bering, Alaska.



(a) Geophysical logs and computed lithology



(b) Squared logs and computed lithology



(c) Computed lithology including an additional component, coaly mineral

Table 1 Summary of zonation parameters used for logs from Bering, Alaska and Boeun boreholes.

Borehole	parameter / Log	run-length	a_{tol}	$\triangle V_{tol}$
Bering	Density	3	0.2	0.2
K-84-4R	Gamma ray	3	20.0	40.0
Boeun	Neutron	3	40	40
149	Density	3	533	533
	Gamma ray	3	2	8

상분석을 위하여 중성자, 밀도, 감마선 검층자료를 사용하였으며, 암상을 결정하는 구성성분으로 사암, 세일, 탄질물, 공극률등 4가지를 택하였다. 구성성분과 검층 반응계수를 결정하기 위해서는 실험실에서의 코어 분석결과가 필요하나, 이것이 여의치 못한 관계로 Fig. 5의 크로스 플롯과 지질주상도의 기재내용을 참고로 하여 사암과 세일의 감마선 검층반응 계수는 대략 평균값을 취하고, 탄질물의 계수는 사암과 약간 차이를 둔 조금 낮은 값으로 하였다. 공극률의 밀도검층 반응 계수는 20000cps로 하여 다음과 같은 반응 방정식을 결정하였다.

$$b_N = 50(f_v)_{sd} + 700(f_v)_{sh} + 950(f_v)_{cm} + 0.0(f_v)\Phi$$
$$b_D = 3000(f_v)_{sd} + 2500(f_v)_{sh} + 7000(f_v)_{cm} + 20000(f_v)\Phi$$

$$b_{GR} = 28(f_v)_{sd} + 40(f_v)_{sh} + 25(f_v)_{cm} + 0.0(f_v)\Phi$$
$$1.0 = (f_v)_{sd} + (f_v)_{sh} + (f_v)_{cm} + (f_v)\Phi$$

여기서 b_N, b_D, b_{GR}은 각각 중성자, 밀도, 감마선 검층 측정치이며, $(f_v)sd$, $(f_v)sh$, $(f_v)cm$, $(f_v)\Phi$는 각각 사암, 세일, 탄질물, 공극률의 부피비율이다.

탄층에 대한 밀도검층치의 cut-off value는 7,000cps로 취하였으며, 그 이하인 곳에서만 윗식에 대한 암상분석을 실시하였다. 여기서 한가지 유의하여야 할 사항은 각 검층치의 측정단위가 성분의 부피비율(volume fraction)에 대하여 과연 선형적인 관계를 가지는가 하는 점이다. 밀도 검층의 경우 검층에 의한 cps 측정치와 암석의 체적밀도가 완전한 선형관계를 가지지는 않는 것으로 알려져 있으나, 금번 calibration용 물체와 암석시료를 이용한 테스트 결과로 볼때, 비선형적 성질은 그리 크지 않는 것으로 나타났으며, 개략적인 분석

의 경우 cps 측정치를 그대로 사용한다고 하여도 별 무리는 없을 것으로 생각된다.

Fig. 4(a), (b)는 본래의 검층곡선 및 구형화한 기록에 대한 암상 분석결과이다. 참고로 코어의 육안감별에 의한 지질 주상도의 결과도 함께 표시하였다. 구역분할을 위한 파라미터는 Table 1에 표시되어 있다.

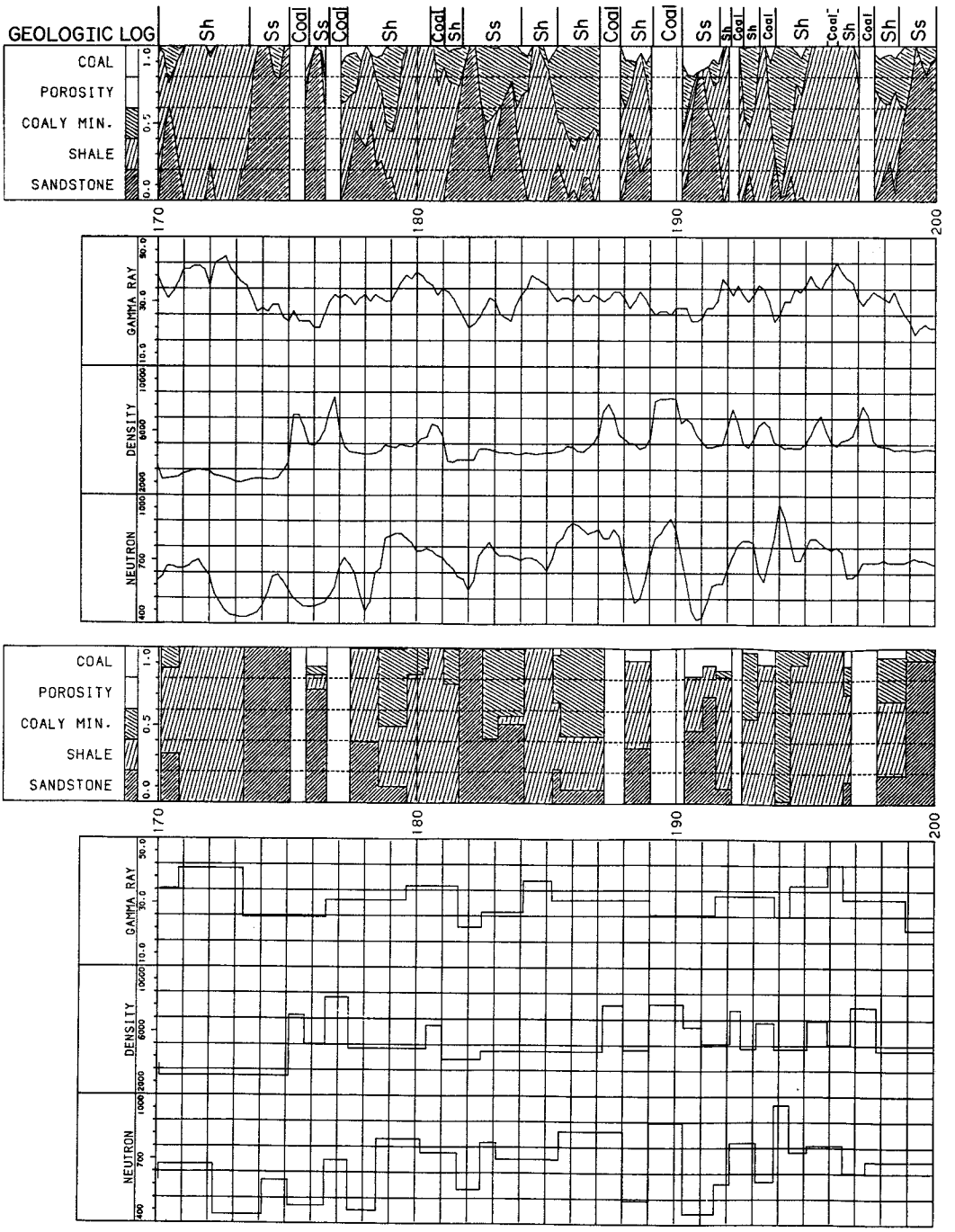


Fig. 4 Computed lithology analysis of geophysical logs from the borehole Boeun 149.
(a) Geophysical logs and computed lithology, (b) Squared logs and computed lithology.

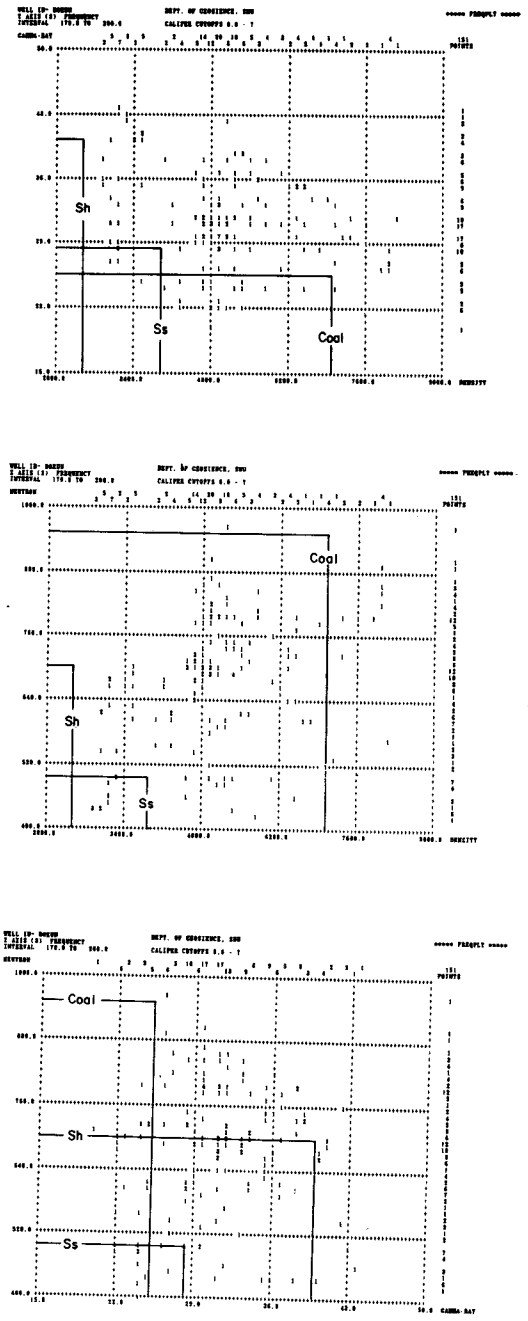


Fig. 5 Cross-plots of log data form the borehole Boeun 149. (a) Gamma ray vs. Density, (b) Neutron vs. Density, (c) Neutron vs. Gamma ray.

결론 및 논의

우리나라 함탄층 지역에서 측정한 물리검층 자료로부터 암상을 구분하고, 석탄의 각종 성질을 정량적으로 분석하기 위하여 탄전지역 시추공들에 대한 야외 물리검층을 실시하고, 검층반응의 특성을 분석하였으며, 이에 필요한 컴퓨터 프로그램을 개발하여, 국·내외에서 얻은 석탄층 검층자료의 해석에 적용하고 그 결과를 평가하였다.

그러나 금번 야외검층을 실시한 지역의 석탄층은 대부분 발달상태가 불량하고, 변질 정도가 심하여 검층자료로부터 탄질의 정량적 분석을 실시하기에는 다소 부적절하였으며, 시추공의 상태도 물리검층을 실시하기에는 적절하지 않은 경우도 많았다. 따라서 이번에 개발한 컴퓨터 프로그램으로 탄층의 판별 및 암상분석만이 가능하였으나, 양질의 자료만 얻을 수 있다면 탄질분석을 위하여서도 성공적으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 탄질분석을 위한 검층기록의 선정이나 입력 파라미터들은 암상분석의 경우와는 차이를 가지므로, 실험실에서의 분석결과와 컴퓨터 해석결과가 일관성을 가질 수 있도록 충분한 비교 검토를 거치는 예비과정이 필요하다. 이를 위하여서는 최소한 몇개의 공이라도 여러개의 탄층이 존재하며, 탄폭이 양호하고, 탄질이 다양하게 나타나는 곳에 시추 위치를 선정하고, 시추공의 상태도 검층에 적절하게 조절하여 기본적인 자료를 얻을 필요가 있다.

사 사

본 연구를 수행하는데 있어 야외검층에 수고하여 주신 장병두씨께 감사를 드리며, 자료를 제공하여 주신 김진후 박사, 컴퓨터 프로그램 작성에 도움을 준 주형태군에게도 감사드립니다.

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 수행되었으므로, 당재단에 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

권병두(1980) 유정 평가를 위한 물리검층의 기본원리. 연구요보 2권, 한국 동력자원연구소, p. 25-46.

권병두, 구자학, 김선억, 정승환(1983) 비퇴적암 지역에서의 물리검층의 응용에 관한 연구. 대한 광산학회지, 제20권, p. 8-16.

권병두, 허식(1988) 탄질에 따른 석탄의 물성변화. 광

산지질학회지에 게재 신청중.

민경덕, 서정희, 권병두(1987) 응용지구물리학. 우성문화사.

서정희, 양승진, 민경덕, 전효택(1979) 함탄층의 지구물리학적 특성에 관한 연구.

Burke, J. A., Curtis, M. R., and Cox. J. T. (1967) Computer processing of log data enables better production in Chaveroo field. J. Pet. Tech., p. 889-895.

Griffiths, C. M. (1982) A proposed geologically consistent segmentation and reassignment algorithm for petrophysical borehole logs, in Cubitt and Reyment (ed.) Quantitative stratigraphic correlation, John Wiley & Sons Ltd.

Harris, M, H., and McCammon, R. B. (1971) A computer oriented generalized porosity - lithology interpretation of neutron, density and sonic logs. J. Pet. Tech., p. 239-248.

Hawkins, D. M., and Merriam, D. F. (1973) Optimal zonation of digitized sequential data. Mathematical Geology, v. 5, p. 389-395.

Hawkins, D. M., and Merriam, D. F. (1974) Zonation of multivariate sequences of digitized geologic data. Mathematical Geology, v. 6, p. 263-269.

Hawkins, D. M., and Merriam, D. F., (1975) Segmentation of discrete squences of geologic data. Geol. Soc. America, Mem. No. 142, p. 311-315.

Hoffman, G. L., Jordan, G. R., and Wallis, G. R. (1982) Geophysical brehole logging handbook for coal exploration. The Coal Mining Research Centre.

Kulinkovich, A., Ye, Sokhranov, N. N., and Churinova, I. M. (1966) Utilization of digital computers to distinguish boundaries of beds and indentify sandstones from electric log data. Int. Geol. Rev., v. 8, p. 416-420.

Lavers, B. A., and Smits, L. J. M. (1981) Recent developments in coal petrophysics. Coal exploration, p. 129-152.

Levine, P. A., Merriam, D. F., and Sneath, P. H. A. (1981) Segmentation of geological data using the Kolmogorov-Smirnov test. Coumputer & Geoscience, v. 7, p. 415-426.

Mosa, M. M. (1968) Computer analysis of lithology logging. MA Thesis, U. of Texas.

Reeves, D. R. (1971) In-situ analysis of coal by borehole logging techniques. CIM Transactions, v. 14 p. 61-69.

Reeves, D. R. (1981) Application of wireline logging techniques to coal exploration. Coal exporation, p. 112-128.

Renwick, R. I. (1981) The use and benefits of downhole geophysical in coal exploration programs. Australian Coal Geology, v. 3, p. 37-50.

Shaw, B. R., and Cubitt, J. M. (1978) Stratigraphic correlation of well logs-an automated approach, in Gill and Merriam (ed.) Geomathematical and petrophysical studies in sedimentology, Pergamon Press.