

탄질에 따른 석탄의 물성 변화

권 병 두* · 허 식*

Variation of the Physical Properties of Coal depending upon the Quality

Byung Doo Kwon and Sik Heo

Abstract : The purpose of this study is to collect basic data which are prerequisite for quantitative analysis of coal logging data. The study involves laboratory measurements of physical properties such as seismic velocities (P,S-waves), resistivity and density of domestic and imported foreign coals. The relationships between these properties were analyzed by using cross-plots.

Correlation between the physical properties of coal and the results of chemical analysis (calorie, fixed carbon, ash, moisture, volatile matter and sulfur contents) was also studied to obtain ideas about coal quality analysis using logging data.

Summarized results are as follows :

1. V_P is exponentially related to V_S . And the average value of V_P is about 1.8 times as large as V_S .
2. Since coal has very low density compared with surrounding sedimentary rocks, density logging is appeared to be the best method for identifying coal seams and evaluating their qualities.
3. For the case of domestic coals, the ash contents and calorie show a perfect inverse relationship. Since the density increases as increase of ash content with a well-defined functional form, the ash content of domestic coals can be estimated by density measurements.
4. Because of low ash content, low density and high resistivity, foreign coals and domestic lignites are easily distinguished from domestic coals.

서 론

국내 부존 에너지 자원으로서 가장 중요한 위치를 차지하고 있는 석탄은 미개발 탄층의 심도가 점점 깊어짐에 따라 지표 탐사의 어려움이 가중되고 있고, 시추 비용 또한 현저히 증가하고 있으므로 탐사 및 개발 부진을 초래하고 있다. 이에대한 한 방안으로서 석탄층 시추를 논·코어링으로 실시하고 층서 구분, 탄층의 판별 및 석탄의 정량적 특성 분석을 물리검층 자료를 이용하여 시도한다면, 시추 시간 및 비용을 절약할뿐만 아니라

특히 분탄층이나 파쇄에 의하여 코어를 제대로 채취할 수 없는 경우에 유용할 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 탄전 지역에서 논·코어링 시추를 실용화하기 위한 전제 조건으로 요구되는 물리검층 자료의 정량적 해석에 필요한 기초자료 획득에 있다. 이를 위하여 우리나라 각 탄적 지역에서 석탄 시료를 채취하여 실험실에서 이들의 탄성과 속도(P파, S파), 전기비저항, 밀도등을 측정하고 이들 물성 간의 상관관계를 크로스-플롯(cross-plot)등을 사용하여 분석하였다. 국내산 탄의 물성과 비교하기 위하여 해외에서 수입한 탄에 대해서도 그 값들을 측정하였으며, 석탄 시료의 물성과 화학 분석치(칼로리, 고정 탄소분, 휘분, 수분, 휘발성 물질, 유황분 함량)사이의 상관관

*서울 대학교 사범대학 지구과학교육과

계를 이용하여 탄질 변화 및 암상 구별과 그 특징을 연구하였다.

석탄 시료의 물성 측정과 탄질 분석

물성 측정 방법

석탄 시료의 성형 : 갱내에서 채취된 석탄 시료는 다이아몬드 톱을 사용하여 각주의 형태로 성형하였다. 물성 측정시에는 기기와의 접촉면이 정확히 수직이 되어야 좋은 결과를 얻을 수 있으므로 대응하는 면끼리 평행하게 단면을 절단하였으며, 연마분을 이용하여 암석 연마기에서 갈았다. 이때에도 물을 사용하면 갈탄과 같은 경우에는 팽창하므로 Ethylen Glycol을 사용하였다.

각주의 크기는 석탄 시료의 크기에 따라 적절히 선정하였다. 압력을 줄 때 층리면이 놓이는 방향에 따라 물성값의 변화가 심하므로 층리 방향에 대한 수직, 수평 방향의 값을 알기 위하여 되도록 세 면을 평행하게 연마하였고, 결(층리)을 따라 갈라지는 탄이나 고결 상태가 불량한 탄의 경우에는 두 면만을 평행하게 연마하였다. 물리 검층을 실시한 공에서 채취한 석탄의 코어 시료들은 직원기등의 모양으로 만들기 위하여 양단을 축에 수직되게 절단하여 괴탄의 경우와 같은 방법으로 연마하였다. 시추 코어의 직경은 대부분 36.5mm(BQ)이다.

탄성과 속도 측정 : 탄성과 속도(P파 및 S파)는 OYO Sonic Viewer (Model 5217 A)를 사용하여 측정하였다. Sonic Viewer는 발진판에서 고주파 펄스(pulse)를 발생시켜 그것이 시료를 통과하여 수신판에 도달하는데 걸리는 시간을 아날로그(analog) 또는 디지털(digital)기록계를 이용하여 측정한다. 측정시 처음으로 신호가 잡히는 곳을 찾는 것이 중요한데, 디지털 기록계의 경우, 샘플시간을 적절하게 조절해 가면서 읽어주어야 하며, 펄스의 발생률을 조정해주어야 한다.

본 연구에서는 파형을 오실로스코프를 이용하여 확대해 보았으며, 샘플시간은 200, 400, 800 nano-sec(10^{-9} sec)를, 펄스 수는 64, 128, 256, 512 pulse/second를 택하였다. P파의 경우, 초동을 비교적 명확히 구분할 수 있었으나, S파의 경우에는 잡음이 많이 들어가고 펄스의 도달이 뚜렷하지 못할 때가 많아 평균 6~7회 측정하여 가장 빈도가 높은 경우를 택하여 주행시간을 결정하였다.

전기 비저항 측정 : 전기 비저항 측정은 시료의 양단에 전류를 흘려 보내고, 시료상의 임의의 두 점 사이에

서의 전압차를 측정하였다.

$$\rho = \frac{A}{L} \cdot \frac{V}{I}$$

ρ : 전기 비저항($\Omega \cdot m$)

A : 면 전류극과 연결되는 시료의 단면적(m^2)

L : 전압차를 측정할 임의의 두 점 M, N사이의 거리(m)

V : M, N사이의 전압차(volt)

I : 가해진 전류(ampere)

각주형 시료(괴탄)의 경우, 바이스 양쪽 날의 안쪽에 각각 탄력성 있는 고무판을 붙인 후, 그 위에 얇은 구리판을 대고 양쪽 구리판에 전원과 전류계를 연결한다. 각주형의 탄 시료를 바이스에 끼우고 부서지지 않을 정도까지 압착하면 시료 양면의 구리판에 면 전류가 형성된다. 시료 위에 되도록 넓은 간격, 그리고 시료의 전길이를 3등분하는 두 점을 표시하고 그 위에 전압계가 연결되어 있는 두 구리침을 접촉시킨다. 이때 접촉 저항을 줄이기 위하여 소량의 황산구리 용액을 접촉부에 묻힌다.

두 면 또는 네 면만을 절단한 시료의 경우에는 전류전극의 접촉부분이 임의의 모양을 가지므로, 이러한 면적을 결정하기 위하여 투명 모눈종이에 시료를 문질러 나타나는 표면적을 면적계를 사용하여 측정하였다.

각주형 시료의 경우 압력에 따른 전기 비저항 값의 변화는 거의 나타나지 않았으며, 측정 방향(층리면에 대하여 평행 또는 수직)에 따른 값도 별다른 차이를 보이지 않았다.

분탄시료의 경우, 측정 원리는 괴탄 시료의 경우와 동일하나 Fig. 1과 같은 기구를 만들어 사용하였다. 외판에는 석탄시료를 넣고 구리판이 부착된 내판으로 압착하였다. 분탄시료의 경우에는 압력에 따라 전기 비저항 값이 커다란 차이를 나타내기 때문에, 압력을 점차 증가시키면서 전기 비저항 변화 곡선을 구하고, 측정치가 별로 변화하지 않는 범위(포화상태)내에서의 값을 그 시료의 전기 비저항으로 취하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 분탄의 전기 비저항은 압력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이때 압력은 바이스의 조임 손잡이의 회전수로서 표시하였으며 절대값은 측정하지 못하였다.

밀도 측정 : 육각형으로 성형된 괴탄 시료의 경우는 버어니어 캘리퍼를 사용하여 부피를 재고, 시료의 무게를 측정함으로써 밀도를 구할 수 있다. 1기압하에서 측정된 값이므로 정확하게 현장 상태(in-situ)의 체적 밀도라고 말하기는 어렵지만, 분탄 시료의 경우보다는 훨씬 현장 상태에 가까운 값을 나타낸다.

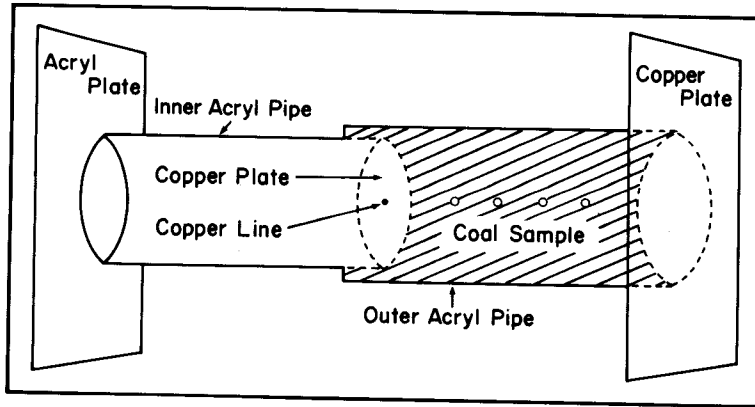


Fig. 1 Laboratory set-up for resistivity measurements of pulverized coal samples.

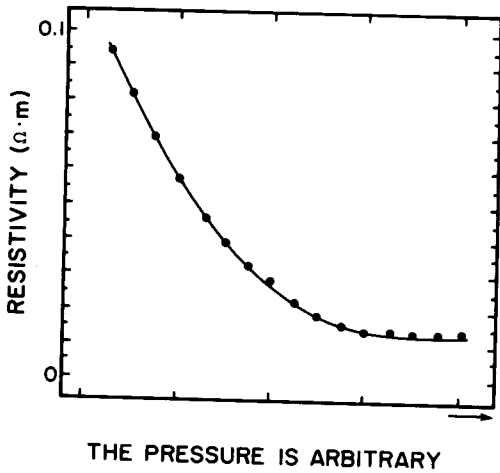


Fig. 2 Resistivity change of pulverized coal samples with increasing pressure.

분탄시료의 경우에는 비중병(pycnometer)을 사용하여 밀도를 측정하였다. 이때 밀도는 석탄의 입자 밀도(matrix density)를 나타내며 아래와 같은 식을 이용하여 구해진다.

$$G = \frac{L(W_2 - W_1)}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)}$$

G = 탄의 밀도(g/cm³)

L = 물의 밀도(증류수의 경우 1g/cm³)

W₁ = 비중병의 무게(g)

W₂ = 비중병과 석탄 시료의 무게(g)

W₃ = 비중병과 석탄 시료와 증류수의 총 무게(g)

W₄ = 비중병과 증류수의 무게(g)

탄질 분석 및 물성 측정 결과

국내 각 탄광에서 채취한 석탄 시료(갈탄 및 탄질 세일 포함)와 외국에서 수입한 탄 시료의 물성 측정 결과 및 탄질 분석치를 Table 1에 수록하였다.

탄질 분석 결과 : 우리나라 석탄 시료의 탄질 분석에 관한 기존 자료들(대한 광업진흥공사, 1976)과 금번 실시한 탄질 분석치를 보면 고정탄소분과 회분을 제외한 여타 물질(휘발성분, 수분, 유황분 등)의 함량은 대개 10% 이하이다.

따라서 탄질 측, 탄의 발열량은 고정 탄소분과 회분의 함량에 결정적인 영향을 받는다. 그러나 같은 열량을 나타내는 경우에도 탄의 종류에 따라 각기 회분 함량은 다를 수 있다.

Table 1의 회분 분석치를 보면 문경 탄전이 가장 낮은 평균치인 18.14%를 보인다. 충남, 삼척, 보은, 정선 탄전이 26~28% 사이의 평균값을 보이고, 호남 탄전이 32.13%이다. 강릉 탄전이 가장 높은 평균값 46.04%를 나타낸다. 이상의 탄전별 회분 함량 분석 결과를 볼 때 문경탄전의 탄질이 가장 좋고, 강릉 탄전의 탄질이 가장 나쁜 것으로 나타나지만, 여기에서는 개개 탄광의 자료 수가 빈약하여 탄전별로 구분하여 분석하였고, 각 자료에는 저질의 시료도 많이 포함되어 있기 때문에 그 값을 일률적으로 각 탄전에 적용할 수는 없다.

국내 탄전의 탄전별, 탄광별 회분 함량의 차이는 석탄층의 변성도 및 석탄층 형성시의 무기물 혼입도 등의 차이에 의하여 모두 영향을 받게 되는 것으로 생각되나(전용원의, 1983), 금번 연구에서는 탐사 시추공으로부터 채취한 저질의 시료도 포함되어 있기 때문에 갯내에서 생산하는 석탄의 평균치보다는 다소 높은 값을 나타

낸 것으로 생각된다.

로서 갈탄 시료의 17.96%나 9개 수입탄 시료의

국내탄 129개 시료에 대한 평균 회분 함량은 27.68% 11.45%보다 훨씬 높은 값을 보여주고 있다.

Table 1 Laboratory measurements of physical properties of domestic coal, coaly shale, lignite and imported foreign coal.

	Vp //	Vp ⊥	Vs //	Vs ⊥	Vp/Vs	Den. Pul.	Den. Lum.	Res. Pul.	Res. Lum.	Shear ×10 ³ kg/cm ²	Lame ² ×10 ³ kg/cm ²	Young ×10 ³ kg/cm ²	Bulk ×10 ³ kg/cm ²	Poi- sson	V.M. %	F.C. %	W.C. %	Ash %	Cal. Cal/g
	m/sec					g/cm ³		ohm-m											
Boeun																			
N	2	2	1	1	1	17	1	17	2	1	1	1	1	1	17	17	17	17	17
AVE	1804	1127	1048	838	2.05	1.98	1.69	1.04×10 ⁻³	2.0×10 ⁻⁴	1.86	4.66	5.04	5.90	0.36	5.04	67.51	2.35	27.48	5429
Chungnam																			
N							15	15						15	15	15	15	15	15
AVE						1.84		1.72×10 ⁻³						2.91	70.73	0.97	26.30	5715	
Gangreung																			
N						9		9						9	9	9	9	9	9
AVE						2.20		3.40×10 ⁻³						4.63	49.34	0.66	46.04	3914	
Honam																			
N	2	2	2	2	2	11	1	11	2	2	2	2	2	2	7	7	7	11	7
AVE	2451	1158	1400	735	1.75	1.87	1.94	3.67×10 ⁻³	8.72×10 ⁻⁴	3.72	3.97	9.36	6.45	0.26	3.91	66.35	2.61	32.13	5353
Jeongseon																			
N	5	2	6	3	5	7	3	8	4	3	3	3	3	3					8
AVE	1710	1060	1009	560	1.68	1.75	1.68	3.11×10 ⁻³	2.28×10 ⁻³	1.53	2.07	3.93	3.10	0.29					28.02
Mungyeong																			
N	6	3	10	4	6	14	2	16	9	4	4	4	4	4					16
AVE	2316	1386	1151	584	1.94	1.82	1.82	3.25×10 ⁻³	1.09×10 ⁻³	2.41	4.82	6.40	6.43	0.33					18.14
Samcheog																			
N	4	2	5	2	4	51	2	48	9	4	4	4	4	4	42	42	42	53	42
AVE	1721	1094	911	697	1.87	1.8	1.68	2.02×10 ⁻³	8.0×10 ⁻³	1.53	2.07	3.87	3.09	0.28	3.76	67.26	2.23	26.44	5499
Domestic Coal																			
N	19	11	24	12	18	124	9	124	26	14	14	14	14	14	94	94	94	129	94
AVE	1992	1212	1082	634	1.84	1.86	1.74	1.12×10 ⁻³	3.58×10 ⁻³	2.12	3.31	5.48	4.73	0.3	3.79	63.21	1.83	27.48	5124
Coaly Shale																			
N						18	23							20	20	20	21	15	
AVE						2.36	4.04×10 ⁻¹							4.76	15.74	0.62	79.13	1463	
Lignite																			
N						4	4												2
AVE						1.55	3.98×10 ⁴												17.96
Foreign Coal																			
N						12	12												9
AVE						1.37	4.18×10 ³												11.45

Den. = Density // = Parallel to laminar Pul. = Pulverized coal V.M. = Volatile Matter W.C. = Water content
 Res. = Resistivity ⊥ = Perpendicular to laminar Lum. = Lump coal F.C. = Fixed Carbon Cal. = Calorie

탄성과 속도 : 탄성과 속도의 측정은 각주형의 피탄 시료만이 가능하였고, 분탄의 경우는 압력 가중 장치의 미비로 측정할 수 없었다. 그러나 피탄의 경우라도 미세한 균열이 발달된 탄은 절단시 충격에 의해 쉽게 갈라지므로 약 20개 정도의 시료에 대해서만 측정 가능하였다.

탄질별로 측정치를 분류 비교하기에는 시료의 수가 너무 적기 때문에, 전체 평균값을 취하여 국내탄의 일반적인 탄성과 속도로서 고찰하였다. 결에 평행한 방향으로 측정된 종파(P파)의 평균속도는 1,990m/sec이고 횡파(S파)의 평균 속도는 1,080m/sec이다. 층리에 평행한 방향으로의 종파 속도는 횡파 속도의 1.5~2.3배이며(Fig. 3), 결에 평행한 방향의 종파 속도는 결에 수직 방향 속도의 1.6~2.2배이며, 이들 두 값은 비교적 좋은 상관관계를 보여준다(Fig. 4).

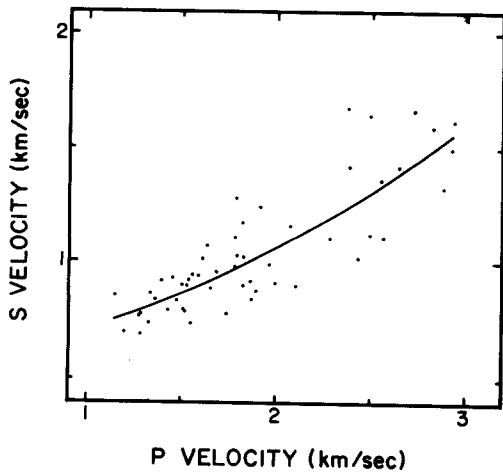


Fig. 3 Shear vs. compressional wave velocities for domestic coals.

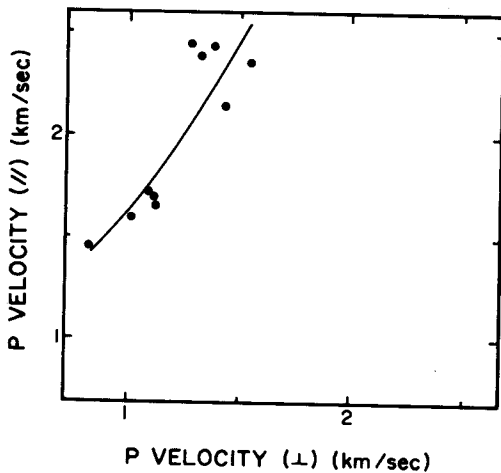


Fig. 4 Relationship between velocities of perpendicular and parallel directions to the bedding planes of coals.

수입탄은 대부분 유연탄류로 분류되나, 수송의 편의를 위하여 파쇄 분탄의 상태로 수입되었으므로 성형이 불가능하여 탄성과 속도나 체적 밀도 등의 측정은 불가능하였다. 그러나 문헌(Hoffman et al., 1982)에서 볼 수 있는 해외 무연탄의 일반적인 속도는 1,800~2,800m/sec 정도로 금번 측정된 국내 무연탄의 상한치에 해당한다. 이처럼 국내탄의 밀도가 해외탄보다 높은 값을 보이는데 반하여 탄성과 속도가 오히려 낮은 것은 국내 탄층은 많은 지각 변동과 화성 활동의 영향으로 석탄 내부에 미세한 균열이 발달하고 분탄화 되었기 때문인것으로 생각된다.

밀도 : 밀도를 결정하는 요인으로는 탄화 정도, 마세랄 함량, 회분 함량, 공극률, 수분 함량 등을 들 수 있다(Serra, 1984). 금번 측정된 분탄시료의 산지별 평균 밀도는 강릉 탄전이 2.20g/cm³로 가장 높은 값을 보여주는데, 이 결과는 앞에서 제시한 회분 함량의 측정 결과와 잘 일치하고 있다.

다음으로는 보은 탄전의 1.98g/cm³, 호남 탄전의 1.84g/cm³, 문경탄전의 1.82g/cm³순이다. 정선 탄전은 1.75g/cm³로서 가장 낮은 평균치를 보이며, 12개 전 시료의 평균치는 1.86g/cm³이다. 이는 12개 수입 탄 시료의 평균치인 1.37g/cm³와 국내산 갈탄의 평균치 1.55g/cm³보다 매우 큰 값이며, 높은 탄화도와 회분 함량에 기인한 것으로 생각된다.

괴탄의 경우, 성형한 시료의 수가 한정되어 있어서 탄성과 속도의 경우와 마찬가지로 전체 평균값을 취하였다. 9개 석탄시료의 평균 밀도는 1.74g/cm³로 동일 시료의 분탄 평균치 1.86g/cm³보다 낮은 값을 보이는데, 이는 비중병을 이용한 분탄의 밀도 측정에서는 공극이 제거되고 결국 입자의 밀도만이 측정되기 때문이다. 괴탄과 분탄의 측정치는 대략 선형적인 관계를 보이는데 괴탄 시료의 밀도가 현장 상태의 체적 밀도에 보다 가까운 값을 나타내므로, 이러한 상관 관계를 이용하면 실험실에서 측정된 분탄 시료의 측정치로부터 석탄의 체적 밀도를 추정할 수 있을 것이다.

18개의 탄질 세일 시료의 평균 밀도값은 2.36g/cm³로 탄의 경우보다 훨씬 크게 나타난다. 따라서 탄질 세일과 탄을 구분할 때에는 밀도가 가장 좋은 척도가 될 수 있다.

전기 비저항 : 석탄의 전기 비저항 값에 영향을 주는 요인으로는 고정탄소분의 함량, 회분의 함량, 수분의 함량, 휘발성분의 함량, 탄화도, 입도, 부가압력, 수소, 산소, 질소 함량 및 온도 등이 있다(현병구, 민경덕, 1967).

탄질별로 분탄의 평균 전기 비저항 값을 보면, 삼척 탄전이 0.0202 Ω·m로 가장 큰 값을 보이고, 다음에

충남, 호남, 강릉, 문경, 정선 탄전이 각각 0.017, 3.67×10^{-3} , 3.25×10^{-3} , $3.11 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 순으로 낮은 값을 나타낸다. 이상 124개의 국내탄 시료의 평균 전기 비저항 값은 $0.0112 \Omega \cdot m$ 로서 12개 수입탄 시료의 $4,180 \Omega \cdot m$ 의 평균 전기 비저항 값이나 4개의 국내산 갈탄 시료의 평균값 $39,000 \Omega \cdot m$ 보다 훨씬 낮다. 수입탄 중 특이한 것은 일본의 petroleum coke의 전기 비저항 값($2.39 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$)으로서, 거의 국내탄의 전기 비저항 값과 비슷하나 시료수가 하나뿐이어서 그 이유는 밝히지 못하였다.

문경 탄전내 봉명 탄광 시료의 경우, 전기 비저항값이 $2.16 \times 10^{-4} \sim 1.04 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 의 매우 낮은 값을 나타내는데 이는 흑연의 전기 비저항값이 평균치인 $1 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 에 아주 가까운 값이다.

괴탄 시료의 평균값은 $3.48 \times 10^{-3} \Omega \cdot m$ 로서 분탄의 전기 비저항 값보다 대체로 낮은 값을 가진다. 동일한 탄에 대한 괴탄시료의 전기 비저항 값과 분탄 시료의 전기 비저항 값은 선형적인 관계로 나타나며, 분탄의 경우가 2배 정도 높은 값을 갖는다.

23개의 탄질 세일의 평균 전기 비저항값은 $0.404 \Omega \cdot m$ 로 탄의 측정치보다 높게 나타나지만 지역에 따라 큰 차이를 보여 탄의 함량이 매우 높거나 전기 전도도가 큰 황철석과 같은 유화광물을 많이 함유하고 있는 경우에는 오히려 탄보다 낮은 값을 나타내기도 한다.

탄성 계수 : P파와 S파의 속도 측정 자료를 이용하여 탄성 계수 중 포아송의 비(Poisson's ratio), 강성률(Shear modulus)과 영률(Young's modulus)을 계산하였다. 그 각각을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\text{강성률 } (\mu) = \rho V_s^2$$

$$\text{라메(Lamé)상수 } (\lambda) = \rho V_p^2 - 2\mu$$

$$\text{포아송비 } (\sigma) = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

$$\text{영률}(E) = 2\mu(1 + \sigma)$$

이상의 탄성 계수들은 V_p , V_s , ρ 의 값을 모두 알고 있는 시료에 대해서만 계산이 가능하므로 14개 시료의 경우만 구할 수 있었다.

일반적으로, 암종별로 강도가 높은 암석일수록 높은 영률 값을 나타낸다. 영률과 포아송 비는 주로 암성의 결합력에 좌우되며, 암석내부의 균열, 절리 등의 유무, 온도, 하중 등에도 영향을 받는다. 균열이나 공극이 많을수록 포아송 비는 감소하며, 이것들이 하중 방향과 평행하게 놓이면 높은 값을 가지게 된다.

국내탄의 평균 영률은 $5.84 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$ 로서 일반 암석들보다 훨씬 낮은 값을 보인다. 강성률의 평균값은 $2.12 \times 10^3 \text{kg/cm}^2$ 이고, 포아송 비의 평균값은 0.299이

다.

탄질 분석치 및 물성간의 상관분석

실험실에서 측정한 석탄 시료의 각종 물리적 성질 사이의 상관관계를 분석하기 위하여 최소 자승법(least square method)에 기초한 상관 관계식을 구하였다.

최적 상관 관계식은 다음 4가지 식중 상관계수(correlation coefficient)가 가장 높은 것을 최적 관계식으로 택하여 도표상에 표시하였다.

$$\text{Linear : } y = A + Bx$$

$$\text{Exponential : } y = A \exp(Bx)$$

$$\text{Logarithmic : } y = A + B \ln x$$

$$\text{Power : } y = A x^B$$

여기서 A와 B는 상수이다.

밀도에 따른 P파 속도 및 탄성 계수의 변화

탄의 밀도가 증가하면 P파 속도도 증가하는 경향을 보여주는데(Fig. 5), 밀도의 변화는 회분 함량과 의미 있는 관계를 가지고 있으므로, 회분 함량이 증가할수록

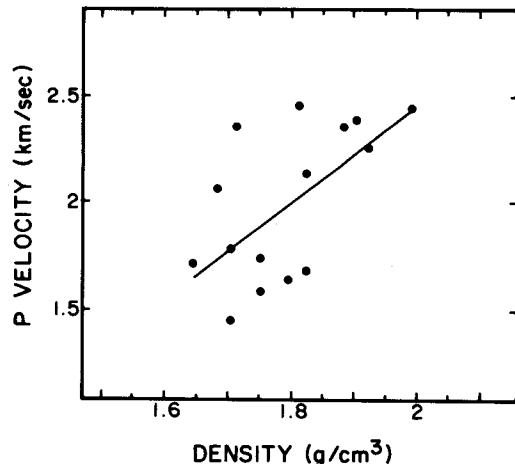


Fig. 5 Compressional wave velocities vs. densities for domestic coals.

P파 속도가 커진다는 것을 알 수 있다. 따라서 순수한 탄의 탄성과 속도는 주위의 퇴적암이나 탄질 세일보다 훨씬 작다는 것을 예상할 수 있다.

포아송 비와 밀도와의 상관계수는 낮은 값을 나타내

나, 밀도가 증가함에 따라 포아송 비는 약간 증가하는 경향을 나타낸다. 영률도 밀도가 커질수록 그 값이 커지는데(Fig. 6), 일반적으로 암종별로 강도가 높은 암석일수록 영률이 크게 나타나므로 본 결과와 잘 일치한다.

강성을 또한 밀도가 커질수록 큰 값을 나타내며, 상관 계수도 대체로 높은 값을 보인다(Fig. 7).

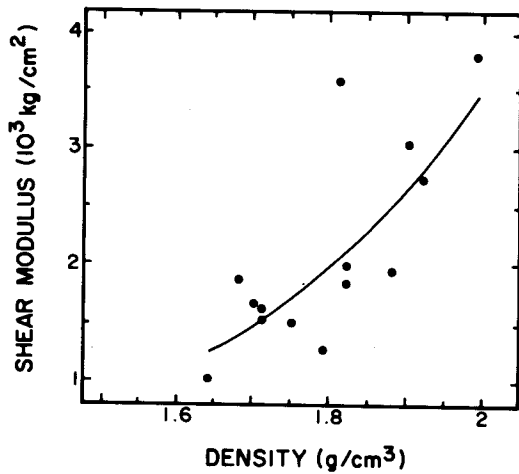


Fig. 6 Relationship between Young's modulus and density for domestic coals.

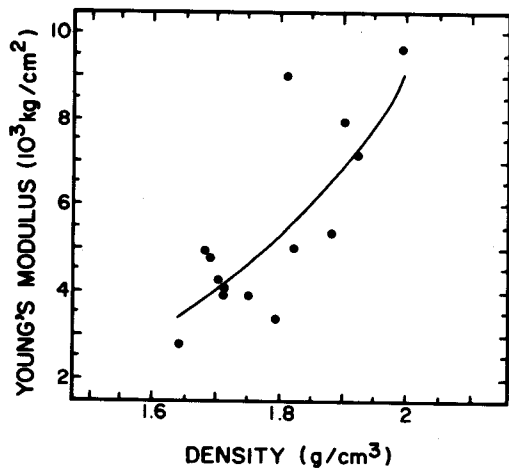


Fig. 7 Relationship between shear modulus and density for domestic coals.

밀도와 전기 비저항의 관계

밀도와 전기 비저항 사이의 관계는 탄전별로 각각 다르게 나타나며, 일의적인 함수 관계로 정의하기 곤란한 분포를 보인다(Fig. 8). 삼척, 충남 탄전의 경우에는 밀도가 증가함에 따라 비저항 값이 커지는 경향을 보이거나, 문경 탄전의 경우에는 오히려 감소하는 것으로 나타난다. 이는 전자의 경우가 비전도성 회분 함량의 증가와 관련되고, 후자의 경우는 탄화도(rank)의 증가에 관련되어 그 원인이 다른 것으로 보이나, 보다 정확한 것은 정밀한 화학분석을 실시하면 알 수 있을 것이다.

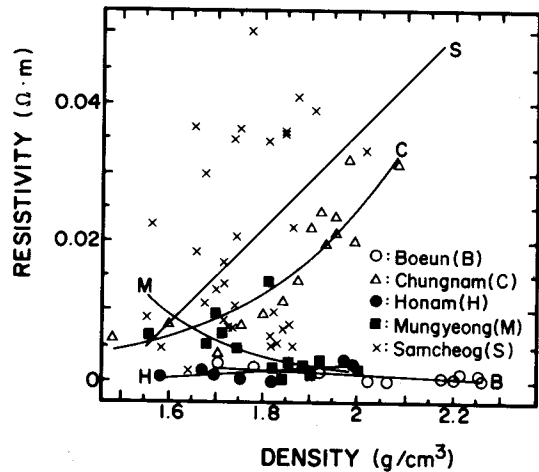


Fig. 8 Correlation between resistivities and densities for domestic coals from various fields.

호남, 보은 탄전에서는 밀도 변화에 따른 전기 비저항 값의 변화가 거의 나타나지 않고 있다.

탄질 세일은 석탄에 비하여 밀도도 크고 전기 비저항 값도 높기 때문에 크로스 플롯상에서 잘 구분된다. 또한 수입탄은 낮은 밀도와 함께 매우 높은 전기 비저항 값을 가지므로 국내탄과는 매우 상이한 특성을 갖는다(Fig. 9).

이와 같이 일반적으로 외국산 역청탄은 주위의 세일이나 탄질 세일에 비하여 매우 높은 전기 비저항 값을 가지므로 야외 검층시 전기 비저항 검층 자료상에서 잘 구분이 되나, 우리나라의 경우에는 탄의 전기 비저항 값이 매우 낮게 나타나므로 검층자료 해석이나 여타 전기 탐사를 실시할 때 이 점에 유의하여야 한다.

회분, 고정 탄소 함량과 발열량의 관계

국내 중요한 탄전 지역에 대하여 회분과 고정탄소분

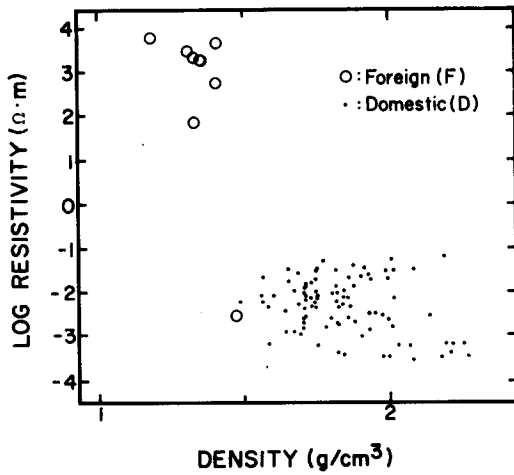


Fig. 9 Resistivities vs. densities representing the different characteristics between domestic anthracites and imported foreign coals.

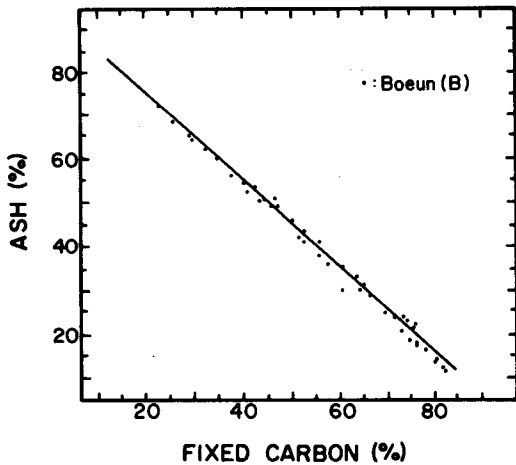


Fig. 10 Correlation between ash and fixed carbon contents for coals from Boeun field.

을 크로스 플롯해보면(Fig. 10; 이 그림은 보은 탄전의 경우이나, 여러 다른 탄전 지역에서도 이와 비슷하게 나온다), 앞의 탄질 분석 결과에서 보았듯이 거의 선형적인 감소 관계를 유지하고 있으며 상관 계수도 0.99 이상으로 아주 좋은 상관 관계를 보여준다. 따라서 특정한 탄전의 시료로부터 회분이나 고정 탄소분 중 하나의 물리량을 측정하면, 그 지역의 상관 관계식을 이용하여 나머지 다른 값도 쉽게 구할 수 있다.

발열량과 회분 함량 사이의 관계도 회분-고정 탄소 분 함량의 사이의 관계와 마찬가지로 거의 완벽한 선형적인 역비례 관계가 성립하며(Fig. 11), 상관 계수 역시 0.99이다.

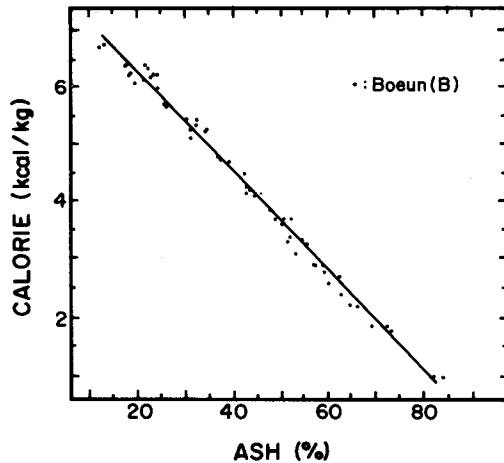


Fig. 11 Correlation between calorific value and ash content of coals from Boeun field.

탄질에 따른 밀도의 변화

탄의 회분 함량을 추정할 수 있는 유일한 파라미터로서 밀도를 가정하고, 이에 영향을 미치는 요인들을 살펴보면, 첫째, 탄의 생성과정과 밀접한 관계를 가지고 있는 구성 광물로서 국내 석탄에 많이 함유되어 있는 석영, 백운모, 견운모, 녹니석, 고령토, 일라이트(illite)와 소량의 납석, 황철석, 능철석, 새니딘(sandidine)등이 있다(전용원의, 1983). 둘째, 광물과 탄에 포함되어 있는 수분으로, 탄의 수분함량은 탄화도(rank)와 관련된다. 마세랄의 구성 물질(inertinite, vitrinite, exinite 등)도 영향을 미친다(Hoffmann et al., 1982).

국내탄은 모두 회분 함량이 증가함에 따라서 밀도도 역시 증가하는 경향을 보인다(Fig. 12). 각 탄전별로 그 특징을 살펴보면 같은 회분함량 범위내에서는 강릉탄전이 가장 높은 밀도 범위를 보이고, 다음이 보은, 충남, 호남, 삼척, 정선 탄전의 순으로 나타난다. 삼척, 문경, 보은 탄전의 시료들은 넓은 범위의 밀도 분포를 보이는데 이는 측정 시료수와도 연관이 있으리라 생각된다.

외국의 수입탄과 국내탄을 비교해보면 회분 함량이

같더라도 국내탄(무연탄)이 수입탄(주로 역청탄)보다 높은 밀도를 가짐을 알 수 있다. 한편, 탄질 세일은 높은 회분 함량때문에 밀도도 높게 나타나므로 탄과 쉽게 구분이 된다.

고정 탄소 함량과 밀도 사이의 관계를 보면, 탄소 함량이 증가함에 따라 밀도가 작아짐을 알 수 있는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 우리나라 석탄은 고정 탄소와 회분 함량의 합이 전체 질량의 90% 이상을 차지하고 있으므로 회분 함량-밀도 관계로부터 이 결과를 예상할 수 있다. 변화의 폭은 보은 탄전의 경우가 가장 심하고, 충남, 삼척 탄전의 순으로 나타난다.

또한 탄에 함유된 수분의 양이 증가할수록 밀도가 작아지는 것도 볼 수 있다.

이상에서 본 바와 같이 석탄의 밀도는 회분 함량의 함수로 나타나고 회분 함량은 발열량과 거의 완벽한 선형 관계를 가지므로, 야외 검층시 밀도 검층자료는 탄층을 판별하고, 회분 함량을 추정하여 탄의 발열량을 직접 구하는데 매우 유용한 수단이 될 수 있다. 따라서 탄층을 판별하고 두께를 결정하는 데에는 밀도 검층 자료만으로도 가능하며, 캘리퍼 검층(caliper logging)을 함께 실시하면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

은 탄전의 경우에는 약간 감소하는 경향을 보이는데, 이는 구성 광물의 전도성 또는 탄화도와 관련이 있을 것으로 생각된다. 삼척 탄전의 경우 회분 함량에 따른 전기 비저항의 증가가 가장 크게 나타나고, 전기 비저항 값의 변화폭도 크다.

탄질 세일은 높은 회분 함량 때문에 전기 비저항 값도 매우 높게 나타나나, 측정치의 변화가 심한 편이다. 수입탄은 낮은 회분 함량에도 불구하고 매우 높은 전기 비저항값을 가지므로, 국내탄과 뚜렷한 물성 차이를 보인다.

또한 국내탄은 고정 탄소 함량이 증가함에 따라 대체로 전기 비저항값은 감소하는 경향을 보이는데, 삼척 탄전에서는 전기 비저항의 변화가 가장 크게 나타나고, 보은 탄전의 경우에는 거의 변화를 보이지 않는다. 탄질 세일은 고정 탄소분의 함량이 적으며, 탄에 비하여 높은 전기 비저항을 나타낸다.

휘발성 물질의 함량이 증가함에 따라 전기 비저항 값도 증가하는 것으로 나타나는데, 이는 기존의 다른 연구결과(Lavers et al., 1981)와도 잘 일치 한다. 삼척과 충남 탄전의 경우에는 이들 관계가 선형적으로 나타나며, 강릉탄전의 경우에는 휘발성 물질의 함량 증가에 따른 전기 비저항의 변화 폭이 그리 크지 않다.

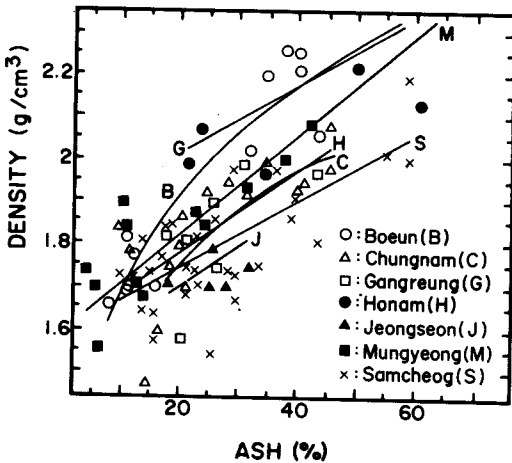


Fig. 12 Correlation between density and ash content for domestic coals from various fields.

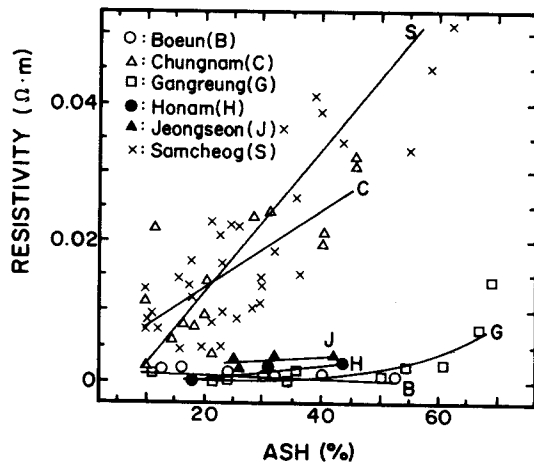


Fig. 13 Correlation between resistivity and ash content for domestic coals from various fields.

탄질에 따른 전기 비저항의 변화

석탄의 전기 비저항 값은 회분 함량이 증가함에 따라 대체로 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 13). 그러나 보

결론

국내의 대표적 탄전에서 채취한 석탄 시료와 해외에서 수입한 탄에 대하여 탄성과 속도(V_P , V_S), 전기 비

저항, 밀도 등을 실험실에서 측정하고 이들 물성간의 상호 관계를 크로스 플롯(cross-plot)기법을 사용하여 분석하였다.

또한, 석탄 시료의 물성과 화학 분석치 사이의 상관 관계를 이용하여 탄질 변화 및 암상 구별과 그 특징을 연구하였다.

요약한 결과는 다음과 같다.

1. 국내탄 시료의 탄성과 속도는 곁에 수직인 방향에 대한 평행 방향의 V_P 값이 1.5~2.3배 정도로 나타나며, 층리와 평행한 방향에서의 V_P/V_S 값은 약 1.8정도이다.

2. 탄질 세일의 전기 비저항 값은 지역에 따라 값의 차이가 크게 나타나지만, 밀도는 탄에 비하여 큰 값을 가지므로 서로를 구별하는데 좋은 파라미터가 될 수 있다. 특히 석탄의 밀도는 주위 퇴적암에 비하여 매우 낮은 값을 가지므로 탄층을 판별하고 탄질을 평가하는 데에도 밀도 검층이 가장 유리한 방법이다.

3. 국내탄의 대부분은 회분 함량이 증가함에 따라 (즉, 고정 탄소 함량이 감소함에 따라), 발열량은 거의 완벽하게 선형적으로 감소한다. 한편, 회분 함량에 따른 밀도의 증가도 좋은 함수 관계를 나타내므로, 밀도 측정치로부터 탄질을 추정할 수 있다. 전기 비저항 값은 시료내의 휘발성 물질의 함량이 증가함에 따라 커지는 경향을 보이고, 보은 탄전을 제외하고는 회분 함량이 증가함에 따라 전기 비저항 값이 커진다.

4. 국내산 갈탄과 수입탄은 낮은 회분함량과 낮은 밀도 값을 나타냄에도 불구하고 매우 높은 전기 비저항 값을 가지므로, 전기비저항 값이 낮은 국내탄과 쉽게 구별된다.

사 사

본 연구는 한국과학재단의 연구비에 의해서 수행된 연구의 일부이며, 연구비를 지원해 준 당 재단에 감사드린다.

본 연구를 수행하는데 도움을 주신 대한광업진흥공사 의 여러분과 한국동력자원연구소의 정현기, 박석환씨 에게도 감사드린다.

참고문헌

- 대한광업진흥공사(1976) 한국의 광상(석탄편), 제7호.
 박석환(1981) 석탄 암석학의 응용에 대하여. 대한 지질 학회지, 제17권, p. 157-160.
 서정희, 양승진, 민경덕, 전효택(1979) 함탄층의 지구 물리학적 특성에 관한 연구. 서울대학교 공과대학. 전용원, 전효택, 안재휴(1983) 우리나라 석탄의 암석 광물 및 지구화학적 연구. 서울대학교 공과대학.
 현병구, 민경덕(1967) 한국 무연탄의 전기적 성질에 관한 연구. 대한 광산학회지, 제4권, p. 181-190.
 BPB(1981) Coal interpretation manual, BPB.
 Hoffmann, G.L., Jordan, G.R., and Wallis, G.R. (1982) Geophysical borehole logging handbook for coal exploration. The Coal Mining Research Centre, Edmonton.
 Lavers, B.A., and Smits, L.J.M. (1981) Recent development in coal petrophysics. Coal Exploration, p. 129-152.
 Serra, O. (1984) Fundamentals of well-logging interpretation. Elsevier, Amsterdam.