

장성탄광 석탄과 수입 중국 석탄의 지구화학적 및 물리적 특성

전효택* · 김명균**

Geochemical and Physical Properties of the Jangseong and Imported Chinese Coals

Hyo Taek Chon* and Myeong Kyun Kim**

ABSTRACT: The petrographic, geochemical, and physical properties of the Jangseong and Chinese coals were investigated. The most common mineral matters of Jangseong coal are kaolinite, muscovite, sericite, illite, quartz and pyrophyllite. Mineral matters in Chinese coal are mainly composed of quartz, calcite, dolomite and kaolinite. Jangseong coal ash has higher content of Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 , As, Rb and V, and lower content of CaO, MgO, Na_2O , Fe_2O_3 and P_2O_5 than those of Chinese coal ash. The liquid limit and the plasticity index of Jangseong coal were compared with those of Chinese coal. The result shows that the briquetting ability of Jangseong coal is a little bit better than that of Chinese coal. The briquetting ability is found to be principally dependent on the type and the content of mineral matter in coal, especially clay mineral.

서론

유일한 국내 부존 에너지자원으로서 석탄이 갖는 경제적 중요성에도 불구하고 석탄자원의 효율적 활용을 위해 필수적으로 선행되어야 할 광물학적, 지구화학적 및 물리적 특성에 대한 기초 연구는 미흡한 실정이다. 외국 특히 미국, 소련, 영국, 독일 및 호주 등은 자국내 부존 석탄의 광물학적, 지구화학적 및 물리적 특성에 대한 기초 연구가 수행되어서 그 결과가 석탄의 탐사로부터 선탄 및 석탄의 활용에 이르기까지 효과적으로 이용되고 있다.

국내 석탄자원에 대한 연구는 대부분 석탄 지질, 부존 상태, 채탄, 선탄에 대한 것으로서, 지금까지 주로 대한광업진흥공사, 대한석탄공사, 한국자원연구소 등에서 발표되어 왔다. 그리고 무연탄의 활용(송태운 등, 1967, 1968), 연탄 제조에 수반되는 성형능의 특성(송태운 등, 1971), 저질탄의 이용(권숙문 등, 1979; 전용원 등, 1980; 이재장, 1987)에 관한 연구도 이루어졌으며, 국내 석탄의 암석광물학적 및 지구화학적 연구는 최근 전용원 등(1984, 1991, 1993)에 의하여 수행된 바 있다.

본 연구에서는 대한석탄공사 장성광업소의 원탄과 선탄

과정에서 분리되는 경석, 그리고 수입탄(중국탄)과 그 경석을 대상으로 광물기재적 연구와 지구화학적 및 물리적 특성에 대한 기초 연구를 수행하였으며, 또한 이러한 특성들 간의 상호 관련성과 특히 무연탄의 점결성(연탄 성형능)에 영향을 미치는 요인을 규명하고자 하였다.

시료 채취 및 분석

장성광업소의 저탄장과 인천의 수입탄(중국탄) 저탄장에서 품위 또는 산지별로 석탄 및 경석을 채취하였으며, 시료 채취 방법은 한국공업규격 KS E 3702에 따랐다. 각 시료당 채취량은 약 20 kg 정도로서, 시료수는 석탄과 경석을 합하여 총 13개이다.

장성광업소의 경우, 채취된 시료는 상부원탄(시료명:URC), 하부원탄(LRC), -25 mm정탄(-25 PC), 소괴(SLC), 중괴(MLC), 대괴(LLC), 경석(HR) 등으로서, '상부원탄'은 600 ML상부 갱도에서 채탄된 원탄을, '하부원탄'은 600ML하부 갱도에서 채탄된 원탄을, '-25 mm정탄'은 선탄 처리된 입도가 25 mm 이하인 정탄을 말한다.

수입탄은 중국에서 수입된 석탄으로서, 채취된 시료는 24,000분탄(시료명:24FC), 24,000괴탄(24LC), 31,000분탄(31FC), 31,000괴탄(31LC), 24,000경석(24HR) 및 31,000경석(31HR) 등이다. 이 중 '24,000분탄', '24,000괴탄' 및 '24,000경석'은 1988년 1월 23일 인천항에 수입된 24,635 ton의 석탄

*서울대학교 자원공학과(Department of Mineral and Petroleum Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

**청주대학교 자원공학과(Department of Mineral and Mining Eng., Chongju Univ., Chongju 360-764, Korea)

중 분상 및 괴상의 원탄과 경석이며, '31,000분탄', '31,000 괴탄' 및 '31,000경석'은 1988년 1월 9일 인천항에 수입된 31,225 ton의 석탄 중 분상 및 괴상의 원탄과 경석이다.

석탄 시료는 대기 중에서 건조시켜 밀도를 측정하였으며, 또한 -20 mesh로 분쇄한 후 일부를 이용하여 한국공업규격 KS E 3713의 '시료 조제 방법'에 따라 연마편을 만든 후 박편으로도 제작하여 현미경 관찰을 하였다. 그리고 -60 mesh로도 분쇄를 하였는데, 이러한 과정에서 시료의 축분은 한국공업규격 KS E 3702의 '인크리먼트 축분 방법'에 따랐다. 그 후 -60 mesh 석탄 시료로 공업분석과 발열량 및 전유황 함량 측정(대한석탄공사 기술연구소에서 분석), 원소(C,H,N) 분석, 물성(액성한계, 소성한계, 소성지수, 압밀계수, 체적압축계수, 투수계수, 간극비, 포화도 등) 측정을 하였으며, 또한 한국공업규격 KS E 3716의 '분석용 시료의 조제 방법'에 의해 회화된 석탄회를 -200 mesh로 미분쇄한 후 HNO₃-HClO₄-HF 혼합산으로 금속블록에서 가열 건조 분해하여 석탄회의 화학성분 분석을 하였다. AAS로는 K, Na, Li, Rb 등의 함량을, ICP로는 Al, Ca, Mg, Fe, Ti, Mn, P, As, B, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, Pb, V, Zn, Zr 등의 함량을 측정하였다. 그리고 현미경에 의한 방법 만으로는 석탄의 광물질 조성을 조사하기 어렵기 때문에, 일부 -60 mesh 석탄 시료를 저온(150℃ 이하)회화(Gluskoter *et al.*, 1981)시킨 후 -200 mesh로 미분쇄하여 X-선회절분석 및 시차열분석도 하였다.

경석 시료는 건조 후 일부를 이용하여 밀도를 측정하였으며, 또한 박편으로도 제작하여 현미경 관찰을 하였다. 그리고 -60 mesh 경석 시료로는 공업분석, 발열량, 전유황 및 원소(C,H,N) 함량 측정, -200 mesh 경석 시료로는 화학성분 분석, X-선회절분석 및 시차열분석을 하였다.

공업분석, 발열량 및 전유황

공업분석, 발열량 및 전유황 함량 측정 결과는 Table 1과 같다.

장성광업소 석탄은 중국탄에 비해서 회분 및 수분 함량이 높으나 고정탄소 함량, 발열량 및 휘발분 함량이 낮아 탄질이 다소 떨어지며, 또한 석탄에 함유된 무기물(주로 광물질)의 양도 많다. 중국탄의 경우, 24,000석탄은 31,000석탄에 비해 회분 함량이 높으나 고정탄소 함량 및 발열량이 낮아 탄질이 다소 떨어진다. 그리고 장성광업소 석탄 및 중국탄은 공히 괴탄이 분탄에 비해 회분 함량은 낮으나 고정탄소 함량 및 발열량은 높아 괴탄의 탄질이 좋게 나타나는데, 이는 채탄시 원탄에 혼입되는 상·하반 경석으로 인한 분탄의 광물질 함량 증가 때문인 것으로 판단된다.

경석의 경우, 장성광업소 경석은 회분 함량이 76.99%, 고정탄소 함량이 17.58%, 발열량이 약 1,800 kcal/kg으로서 상당량의 유기물(탄질물)을 함유하나, 중국탄의 경석들(24,000

Table 1. Proximate analysis, calorific value and physical properties of coal and rock samples.

element	unit	coal mine								
		Jangseong			China					
		coal		rock	coal		rock			
		mean	range		mean	range	24000	31000		
MS ¹⁾	(%)	4.12	3.16-4.82	1.28	2.53	2.51	2.56	2.14-2.87	0.05	0.75
Ash	(%)	27.31	14.64-42.12	76.99	16.47	20.11	12.83	11.10-22.52	95.24	90.87
V.M. ²⁾	(%)	3.67	2.89-4.25	4.15	8.65	8.51	8.79	7.26-10.31	4.71	7.97
F.C. ³⁾	(%)	64.90	50.47-77.65	17.58	72.36	68.88	75.83	66.74-79.03	0	0.41
Q ⁴⁾	(kcal/kg)	5,502	4,310-6,610	1,820	6,695	6,420	6,970	6,130-7,350	0	0
S ⁵⁾	(%)	0.34	0.13-0.47	0.61	0.38	0.42	0.33	0.28-0.47	0.04	0.03
LL ⁶⁾	(%)	25.3	24.5-26.0		22.5	21.9	23.2	21.8-24.1		
PL ⁷⁾	(%)	17.8	16.7-18.8		15.7	15.5	16.0	14.1-17.8		
PI ⁸⁾	(%)	7.5	7.2-7.8		6.8	6.4	7.2	5.6-8.2		
Cv ⁹⁾	(cm ² /sec)	0.0667	0.0448-0.0910		0.0723	0.0661	0.0785	0.0642-0.0844		
m ¹⁰⁾	(×10 ⁻³ cm ² /kg)	5.82	5.35-6.20		5.73	5.47	6.00	5.39-6.15		
k ¹¹⁾	(×10 ⁻⁷ cm/sec)	3.847	2.792-4.869		4.157	3.618	4.697	3.460-4.929		
e ¹²⁾		0.4358	0.4180-0.4846		0.4427	0.4975	0.3879	0.3559-0.5251		
Sd ¹³⁾	(%)	101.28	89.22-113.24		105.43	96.33	114.53	94.49-126.79		
ρ ¹⁴⁾	(g/cm ³)	2.17	2.15-2.19	2.68	1.82	2.02	1.61	1.61-2.02	2.19	

1) MS : Moisture; 2) V.M. : Volatile Matter; 3) F.C. : Fixed Carbon; 4) Q : Calorific Value (Dry Basis); 5) S : Total Sulfur; 6) LL : Liquid Limit; 7) PL : Plastic Limit; 8) PI : Plasticity Index; 9) C_v : Coefficient of Consolidation; 10) m_v : Coefficient of Volume Compressibility; 11) k : Coefficient of Permeability; 12) e : Void Ratio; 13) S_d : Degree of Saturation; 14) ρ : Density

Table 2. Mineral matters in coal and rock samples.

coal mine	sample	Kaol	Musc	Ser	Ill	Qz	Prp	Chl	Cal	Py	Rt	Dol	Sid
Jang-seong	URC	■	■	■	■	■	□	□	-	-	-	-	-
	LRC	■	■	■	■	■	■	□	-	-	-	-	-
	-25PC	■	■	■	■	■	■	□	-	-	-	-	-
	SLC	■	■	■	■	■	■	■	-	□	-	-	-
	MLC	■	■	■	■	■	■	□	-	-	□	-	-
	LLC	-	■	■	■	■	□	□	-	-	-	-	-
	HR	□	□	□	□	■	□	□	-	-	-	-	-
China	24FC	□	□	□	□	■	-	□	■	-	-	-	-
	24LC	-	□	□	□	-	-	□	-	-	-	■	-
	31FC	■	□	□	□	■	-	□	■	-	-	-	-
	31LC	■	□	□	□	-	-	□	■	-	-	-	-
	24HR	-	-	-	-	■	-	-	□	-	-	-	-
	31HR	□	□	□	□	■	-	□	-	-	-	-	

Kaol : Kaolinite; Musc : Muscovite; Ser : Sericite; Ill : Illite; Qz : Quartz; Prp : Pyrophyllite; Chl : Chlorite; Cal : Calcite; Py : Pyrite; Rt : Rutile; Dol : Dolomite; Sid : Siderite; ■ : major; □ : minor; - : trace; : none.

및 31,000경석)은 회분 함량이 90% 이상, 고정탄소 함량 및 발열량이 0% 및 0 kcal/kg으로서 탄질물이 없다. 중국탄의 경석들을 상호 비교하여 보면, 31,000경석은 24,000경석에 비해 수분 및 휘발분 함량이 높으나 회분 함량이 낮는데, 31,000경석 및 24,000경석에는 탄질물이 없는 것으로 보이는 경석의 점토광물(분석 결과, 확인된 광물은 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 녹니석 등) 함량의 차이 때문인 것으로 추정된다. 즉, 31,000경석은 24,000경석에 비해 상기한 점토광물을 많이 함유하는데(Table 2 참조), 이러한 점토광물은 600°C 이상의 온도에서 구조수(water of hydration)를 유실하기 때문에 31,000경석이 24,000경석에 비해 낮은 회분 함량을 나타내는 것으로 판단된다.

Table 1에서 보면 장성광업소 석탄과 중국탄의 전유황 함량은 대체로 유사하며, 이러한 전유황의 기원은 소량 함유된 황철석 때문인 것으로 추정된다. 황철석이 단괴로 산출되는 경우 수선 및 물리적 선탄 방법에 의해 쉽게 제거될 것으로 판단되나, 석탄 전체에 세립질로 분산 산출되는 경우 탄질물과 견고한 결합 상태를 보이기 때문에 물리적 선탄 방법으로는 황철석의 제거가 불가능할 것으로 사료된다.

광물 기재

석탄

Table 2에서 보면, 시료에 따라 다소 차이는 있으나 장성 광업소 석탄의 광물질에는 일반적으로 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 석영 등이 다량 함유되며, 그의 납석과

녹니석은 상당량, 그리고 황철석, 금홍석, 방해석, 백운석 및 능철석 등은 극소량 포함된다.

중국의 24,000석탄(분탄 및 괴탄)의 광물질에는 석영, 방해석, 백운석 등이 다량 함유되며, 기타 녹니석, 백운모, 견운모, 일라이트, 카오리나이트 등은 상당량, 그리고 황철석과 금홍석은 극소량 포함된다. 24,000분탄과 24,000괴탄의 광물질 조성의 차이를 보면, 석영, 방해석, 카오리나이트 등은 24,000분탄의 광물질에 다량 또는 상당량 함유되나, 백운석은 24,000괴탄의 광물질에 매우 다량 들어 있다.

31,000석탄(분탄 및 괴탄)의 광물질에는 방해석, 카오리나이트, 석영 등이 다량 함유되며; 기타 백운모, 견운모, 일라이트, 녹니석 등은 상당량, 그리고 황철석, 금홍석, 백운석 등은 극소량 포함된다. 31,000분탄과 31,000괴탄의 광물질 조성의 차이를 보면, 석영은 31,000분탄의 광물질에 다량 함유되나, 백운석은 31,000괴탄의 광물질에서만 극소량 산출된다.

이러한 결과로 볼 때, 장성광업소 석탄과 중국탄의 광물질 조성에는 상당한 차이가 있다. 즉, 방해석과 백운석 등은 중국탄의 광물질에 매우 다량 함유되나, 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 납석 등은 장성광업소 석탄의 광물질에 다량 포함된다. 또한 황철석과 금홍석도 극소량이지만 장성 광업소 석탄의 광물질에 다소 많이 함유되며, 능철석도 장성광업소 석탄의 광물질에만 극소량 포함된다.

중국의 24,000석탄과 31,000석탄의 광물질 조성 간에도 상당한 차이가 있다. 즉, 석영, 녹니석, 백운모, 견운모, 일라이트 등은 그 함량차가 크지 않지만 24,000석탄의 광물질에 다소 많이 함유되며, 백운석도 24,000석탄의 광물질에 다량 포함된다. 그러나 카오리나이트는 31,000석탄의 광물질에 다량 함유된다.

경석

장성광업소 경석은 전기한 바와 같이 탄질물이 상당량 있는 탄질 세일로서, Table 2에서 보이는 바와 같이 석영을 다량 함유하며, 기타 납석, 녹니석, 백운모, 견운모, 일라이트, 카오리나이트 등도 상당량, 그리고 황철석과 금홍석도 극소량 포함한다. 따라서 장성광업소 경석의 광물 조성은 상기한 장성광업소 석탄의 광물질 조성과의 유사함을 알 수 있다.

중국탄의 24,000경석은 주로 석영과 방해석으로 구성되나 특히 석영이 주 구성광물이며, 기타 백운모, 견운모, 일라이트, 카오리나이트 등도 극소량 함유한다.

중국탄의 31,000경석은 탄질물이 거의 없는 이질 세일로서 주로 석영으로 구성되며, 기타 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 녹니석 등도 상당량, 그리고 금홍석도 극소량 함유한다.

Table 3. Contents of chemical elements in coal, coal ash and rock samples.

element	unit	coal mine								
		Jangseong			China					
		coal ash(or coal)		rock	coal ash(or coal)			rock		
		mean	range		mean		range	24000	31000	
			24000	31000						
Al ₂ O ₃		30.47	26.09-41.64	27.24	25.01	23.73	26.40	18.36-34.24	4.93	24.49
K ₂ O		3.29	2.83-4.26	2.89	1.24	1.89	0.59	0.18-2.47	0.12	2.87
Na ₂ O		0.03	0.01-0.04	0.02	0.20	0.21	0.19	0.14-0.27	0.09	0.12
CaO		1.06	0.21-1.85	0.60	10.22	14.29	6.14	5.81-21.05	10.77	0.09
MgO	wt. %	0.75	0.18-1.02	1.26	3.59	6.30	0.87	0.80-11.17	0.30	0.69
Fe ₂ O ₃ *		4.02	0.37-4.85	4.89	4.98	6.46	3.50	2.77-7.65	1.07	1.60
TiO ₂		1.85	1.45-2.26	1.34	0.74	0.79	0.69	0.23-1.14	0.11	1.09
P ₂ O ₅		0.24	0.08-0.58	0.32	1.01	0.56	1.47	0.53-2.31	0.28	0.35
MnO		0.03	0.01-0.03	0.03	0.04	0.06	0.02	0.01-0.07	0.10	0.01
As		834	711-988	632	686	620	753	564-769	135	616
B		22	0-28	24	27	32	22	21-38	4	7
Cd		5	2-6	4	5	6	5	5-7	1	3
Co		21	15-23	21	29	18	36	19-43	1	18
Cr		54	37-66	63	74	87	62	61-103	11	46
Cu		89	71-111	50	71	45	97	30-117	33	45
Ga	ppm	87	39-104	84	127	169	87	80-246	15	57
Ge		40	6-48	41	51	65	39	37-81	7	16
Li		324	185-438	143	310	151	470	141-525	29	68
Pb		266	173-325	164	254	228	282	219-284	88	148
Rb		159	124-218	126	35	49	21	9-66	4	130
V		217	194-232	175	127	114	140	104-148	27	170
Zn		164	97-244	172	141	183	99	84-222	61	177
Zr		279	200-351	151	237	195	280	184-325	4	139
C		57.26	45.52-63.71	8.68	62.01	56.22	67.79	55.02-69.28	1.62	17.38
H	wt. %	0.78	0.57-0.85	0.55	3.33	3.98	2.69	1.68-4.55	0.42	3.51
N		0.27	0.17-0.35	0.14	0.96	0.76	1.16	0.49-1.32	0.04	0.37

*Fe₂O₃ : total Fe as Fe₂O₃

이상의 결과로 볼 때, 장성광업소 경석과 31,000경석은 남석과 황철석을 제외하고서는 광물 조성이 유사하나, 24,000경석의 광물 조성은 이와 현저히 다르다. 즉, 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 녹니석 등은 장성광업소 경석 및 31,000경석에 상당량 함유되나, 방해석은 24,000경석에서만 상당량 산출된다.

지구화학적 특성

주·부성분 원소

석탄회 및 경석의 주·부성분 원소의 평균 함량, 함량 분포 범위는 Table 3과 같다.

장성광업소 석탄회는 중국 석탄회에 비하여 Al₂O₃, K₂O, TiO₂ 함량이 상대적으로 높은 반면에, CaO, MgO 함량이 상당히 낮으며 Na₂O, Fe₂O₃(이후 언급되는 Fe₂O₃는 total Fe임), P₂O₅

함량도 다소 낮다. 그리고 MnO 함량에 있어서는 큰 차이가 없다. 이와 같은 석탄회의 화학 조성의 차이는 전기한 바와 같은 석탄의 광물질 조성의 차이와 밀접한 관련성을 가진다. 즉, 중국탄의 광물질에는 방해석, 백운석 등이 매우 다량 포함되나, 장성광업소 석탄의 광물질에는 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 남석 등이 다량 함유되며 금홍석도 소량이지만 중국탄에 비해 다소 많이 들어 있기 때문에 상기한 바와 같은 화학 조성의 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

중국의 24,000 및 31,000석탄회의 주·부성분 원소의 함량 특성을 보면, 24,000석탄회는 31,000석탄회에 비하여 K₂O, CaO, MgO, Fe₂O₃ 함량이 높은 반면에, Al₂O₃ 및 P₂O₅ 함량이 다소 낮으며, Na₂O, TiO₂ 및 MnO 함량에 있어서는 큰 차이가 없다. 이러한 분포 특성도 석탄의 광물질 조성과의 밀접한 관련성을 가진다. 즉, 24,000석탄의 광물질에는 백운석이 다량 포함되며 또한 녹니석, 백운모, 견운모, 일라이트, 황철석 등도 31,000석탄에 비해 다소 많이 함유된 반면에, 31,000석탄의

광물질에는 카오리나이트가 다량 들어 있기 때문에 상기한 분포 특성이 나타나는 것으로 판단된다.

경석의 주·부성분 원소의 함량 특성을 보면, 장성광업소 경석 및 31,000경석의 Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 함량은 상호 유사하며, 또한 24,000경석에 비해서는 상당히 높다. 반면에 CaO 함량은 장성광업소 경석 및 31,000경석에 비해 24,000경석에서 매우 높다. Fe_2O_3 함량은 24,000 및 31,000경석에 비해 장성광업소 경석에서 상당히 높으며, Na_2O , MgO , P_2O_5 , MnO 의 함량은 큰 차이가 없다. 이러한 경석의 주·부성분원소의 함량 차이도 경석의 광물 조성의 차이를 잘 반영해 주고 있다(Table 2 참조).

미량원소

석탄회 및 경석에 함유된 미량원소의 평균 함량 및 함량 분포 범위는 Table 3과 같다. 장성광업소 석탄회와 중국 석탄회의 미량원소 함량을 상호 비교하여 보면, B, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, Li, Pb, Zn, Zr 등의 함량은 대체로 유사하다. 그러나 As, Rb, V는 중국 석탄회에 비해 장성광업소 석탄회에 부화되는데, 특히 Rb는 약 4.5배, V는 약 2배 정도 부화되어 있다.

중국의 24,000 및 31,000석탄회의 미량원소 함량을 상호 비교하여 보면, Li를 제외한 기타 원소들의 함량은 대체로 유사하다. 그러나 Li는 24,000석탄회에 비하여 31,000석탄회에 약 3배 정도 부화되는 특징을 보인다.

경석의 미량원소 함량을 보면, 장성광업소 경석과 31,000경석의 미량원소 함량은 B, Ge, Li 등을 제외하고서는 상호 유사하나, 24,000경석은 모든 미량원소 함량이 장성광업소 경석과 31,000경석에 비해서 현저히 낮은 특징을 보인다. 이는 경석의 광물 조성 때문인 것으로 추정된다. 즉, 전기한 바와 같이 장성광업소 경석과 31,000경석은 납석과 황철석을 제외하고서는 광물 조성이 상호 유사하나, 24,000경석의 광물 조성은 이와는 현저히 다르기 때문에, 이와 같은 분포 특성이 나타나는 것으로 추정된다.

탄소, 수소 및 질소

석탄 및 경석에 함유된 C, H 및 N 함량은 Table 3과 같다.

중국탄의 C, H, N 함량은 장성광업소 석탄에 비해 높게 나타난다. 중국탄도 24,000석탄은 31,000석탄에 비해 H 함량이 높으나, C 함량은 10% 이상 상당히 낮으며, N 함량도 다소 낮은 경향을 보인다.

물리적 특성

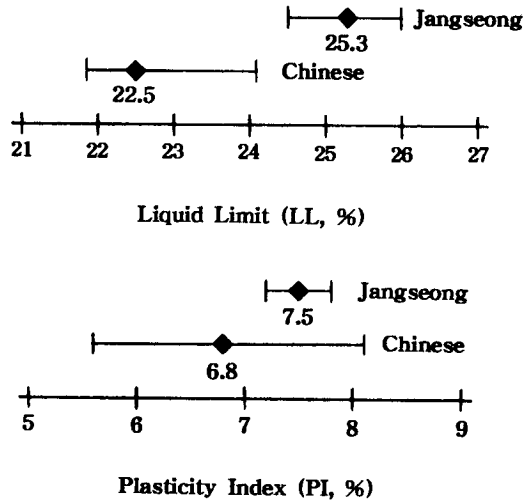


Fig. 1. Mean and range of the liquid limit and the plasticity index of Jangseong and Chinese coals. Diamond is mean Value, and bar shows range.

점결성(연탄 성형능)

점결성은 토질공학적 용어로 나타내면 소성성이라 할 수 있으며, 이러한 소성성은 액성한계(LL)와 소성지수(PI)의 크기로서 거의 정확하게 판단할 수 있다.

Table 1과 Fig. 1의 액성한계와 소성지수 측정 결과를 보면, 장성광업소 석탄의 액성한계는 24.5%~26.0%(평균 : 25.3%), 소성지수는 7.2%~7.8%(평균 : 7.5%)의 분포를 보이나, 중국탄의 액성한계는 21.8%~24.1%(평균 : 22.5%), 소성지수는 5.6%~8.2%(평균 : 6.8%)의 분포를 나타낸다. 즉, 장성광업소 석탄의 액성한계는 중국탄의 액성한계에 비해 다소 크며, 소성지수도 그 분포 범위는 중복이 되나 평균치로 볼 때 장성광업소 석탄에서 다소 크게 나타난다. 따라서 장성광업소 석탄의 점결성이 중국탄에 비해 다소 좋다고 판단된다.

투수시험

투수성은 간극비에 따라 좌우된다. 본 시험에서 사용된 시료는 -60 mesh의 분말 상태로서 고유간극비를 결정할 수 없기 때문에, 전 시료에 대하여 동일한 선행하중을 가하여 압밀이 완료된 후, 선행하중과 같은 크기의 하중을 다시 가하면서 최종 압밀시험을 행하여, 이 결과로부터 투수계수를 산출하였다. 이때의 간극비는 최종 압밀시험 시료의 간극비의 평균치로 하였다. 선행하중의 크기는 6.4 kg/cm²이었으며, 최종 압밀시험의 평균 압밀하중은 9.6 kg/cm²로서, 이는 대략

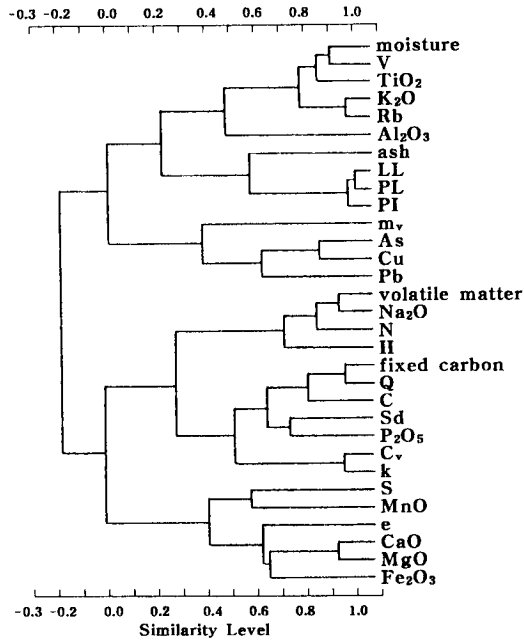


Fig. 2. Dendrogram plotted from R-mode cluster analysis of the measured properties of coal and coal ash samples(Refer to Table 1 for the abbreviation).

지하 120 m 깊이의 토양이 받는 하중과 동일하다.

장성광업소 석탄과 중국탄의 투수시험 결과는 Table 1과 같다. 장성광업소 석탄과 중국탄의 투수계수 및 간극비는 그 분포 범위가 유사하여, 장성광업소 석탄과 중국탄의 투수성은 대체로 오차 범위 내에서 동일하다고 판단된다.

밀도

석탄의 밀도 측정시, 괴탄 만을 대상으로 거의 직육면체로 성형한 후 체적과 질량을 측정하여 밀도를 구했다. 측정 결과 (Table 1 참조), 장성광업소 석탄의 밀도가 중국탄에 비해 크며, 중국탄도 24,000괴탄의 밀도가 31,000괴탄에 비해 크다. 이는 Table 1에서와 같이 장성광업소 석탄이 중국탄에 비해 회분 함량이 높고 고정탄소 함량이 낮기 때문이며, 중국탄도 24,000괴탄이 31,000괴탄에 비해 회분 함량이 높고 고정탄소 함량이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 석탄의 탄질물은 광물질에 비해 밀도가 작기 때문에 광물질의 함량 즉, 회분의 함량이 많을수록 석탄의 밀도가 커지는 것으로 판단된다.

고 찰

장성광업소 석탄 및 중국탄의 공업분석, 발열량, 전유황

함량, 석탄 및 석탄회의 원소 함량, 그리고 물성들 간의 상호 관련성을 규명하기 위해 상관계수를 구한 후, R형 군집분석을 한 결과 얻어진 dendrogram은 Fig. 2와 같다. 이러한 통계 처리 결과로부터 상호 관련성이 좋은 측정요소 간의 관계를 보면 다음과 같다.

Fig. 2에서 보면, (소성지수-액성한계-소성한계) 등의 요소는 0.9 이상의 매우 높은 유사도 수준에서 군집을 형성한다. 또한 이러한 군집은 0.6정도의 유사도 수준에서 (회분 함량) 과도 군집을 형성하며, 다소 낮은 유사도 수준이지만 (수분 함량-석탄회의 V함량-석탄회의 TiO₂함량-석탄회의 K₂O함량-석탄회의 Rb함량-석탄회의 Al₂O₃함량) 등의 요소와도 양(+)의 상관관계로서 서로 군집을 형성한다. 그러나 (소성지수-액성한계-소성한계) 군집은 (고정탄소 함량-발열량-C함량) 군집과는 음(-)의 상관관계를 보인다. 따라서 점결성 즉, 소성성에 관련된 지수들인 (소성지수-액성한계-소성한계) 등의 요소들은 상호간에 밀접한 관련성을 가지면서, 또한 (회분 함량-수분 함량-석탄회의 K₂O함량-석탄회의 Al₂O₃함량) 및 (고정탄소 함량-발열량-C함량) 등의 요소와도 상당한 관련성을 가지고 있음을 알 수 있다.

이러한 관계로 볼 때 석탄의 회분 함량은 증가하고 고정탄소 함량, 발열량 및 C함량은 감소할수록 즉, 석탄의 광물질 함량은 많고 탄질물 함량은 적을수록 석탄의 점결성은 양호해짐을 알 수 있다. 또한 점결성은 석탄회의 K₂O함량 및 Al₂O₃함량과도 상당한 관련성을 가지는 것으로 보아, 석탄에 함유된 광물질 중에서도 특히 K₂O와 Al₂O₃를 함유하는 광물 즉, Table 2에서 보이는 바와 같이 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 남석 등과 같은 층상 알루미늄-규산염광물인 점토광물의 함량이 많아지면 점결성이 좋아지는 것으로 판단된다.

그리고 점결성은 석탄의 수분 함량과도 상당한 관련성을 가지고 있는데, 이러한 수분 함량은 석탄회의 K₂O함량과는 양호한 양의 상관관계(상관계수: 0.71)를 가지나, 석탄회의 CaO함량과는 양호한 음의 상관관계(상관계수: -0.73)를 나타낸다. 즉, 수분의 함량이 많을수록 석탄회의 K₂O함량은 증가하나 CaO함량은 감소한다. 따라서 석탄의 수분 함량은 석탄에 함유된 광물질 중에서도 함K₂O광물 즉, 상기한 점토광물의 양이 많아짐에 따라 증가하나, 함CaO광물인 방해석 및 백운석 등의 함량과는 역관계에 있으며, 석탄의 수분 함량은 광물 표면의 특성에 많은 영향을 받을 수 있다. 즉, 석탄의 점결성은 점토광물 표면의 흡착수의 양이 증가할수록 양호해지는 것으로 판단된다. 이러한 흡착수는 점토 입자를 둘러싸는 이중층수(double-layer water) 중 가장 깊이 있는 층으로서 점토 입자에 의하여 강하게 결속되어 있으며 점성이 강해 점토의 소성을 나타내게 한다. 따라서 점토광

물의 종류와 양이 석탄의 점결성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

이상을 종합하여 보면, 석탄의 점결성 즉, 연탄 성형능은 석탄내의 광물질 함량이 많을수록 그리고 탄질물의 함량이 적을수록 좋아지는데, 특히 광물질 중에서도 점토광물(카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트 및 납석 등)의 함량이 많을수록 양호해진다. 그러나 방해석 및 백운석 등의 함량 증가는 점결성의 향상에 큰 영향을 미치지 못한다. 즉, 석탄의 점결성에 영향을 미치는 주 요인은 석탄내의 광물질, 특히 점토광물의 종류와 그 함량이라고 판단된다. 그리고 이러한 결과는 함백 및 은성광업소 석탄의 점결성 차이에 대한 전효택, 김명균(1994) 및 송태운 등(1971)의 연구 결과와도 일치하며, 흙의 소성성(액성한계 및 소성한계)은 흙 속에 있는 점토광물의 종류와 양에 영향을 받는다는 사실(Braja, 1987) 과도 부합된다.

Fig. 2에서 보면 석탄회의 V함량은 석탄회의 TiO₂함량과 매우 밀접한 상호 관련성(상관계수: 0.89)을 가지고 있어, V는 TiO₂ 즉, 금홍석과 밀접하게 수반된다고 추정된다. 전기한 바와 같이 중국 석탄회에 비해 장성광업소 석탄회에는 V가 약 2배 부화되는데, 실제로 장성광업소 석탄의 광물질에 함유된 금홍석 함량은 중국탄의 광물질에 비해 다소 크게 나타난다(Table 2 및 3 참조).

석탄회의 K₂O함량과 Rb함량도 0.9이상의 매우 높은 유사도 수준에서 군집을 형성(상관계수: 0.96)하는데, 이는 K와 Rb 원자의 화학적 특성의 유사성 때문이다. 따라서 Rb는 함K₂O 광물인 백운모, 견운모, 일라이트와 매우 밀접하게 수반된다고 추정된다. 전기한 바와 같이 Rb는 중국 석탄회에 비해서 장성광업소 석탄회에 약 4.5배 부화되는데, 실제로 백운모, 견운모, 일라이트 등은 장성광업소 석탄의 광물질에 다량 함유되나, 중국탄의 광물질에는 소량 들어 있다(Table 2 및 3 참조).

석탄회에 함유된 As, Cu, Pb 원소들도 0.6 이상의 유사도 수준에서 군집을 형성하는데, 이는 As, Cu, Pb 등이 친동원소로서 서로 유사한 지구화학적 특성을 가지고 있기 때문인 것으로 판단된다.

결 론

장성광업소 석탄 및 경석, 그리고 중국탄(24,000석탄 및 31,000석탄) 및 경석의 공업분석, 발열량 및 전유황 함량, 화학조성, 광물질 조성, 물성에 대한 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 중국탄은 장성광업소 석탄에 비해 탄질이 양호하며, 중국탄도 31,000석탄의 탄질이 24,000석탄의 탄질에 비해 다소

좋다. 장성광업소 석탄과 중국탄의 전유황 함량은 대체로 유사하다.

2) 장성광업소 석탄의 광물질에는 대체로 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 석영 등이 다량 함유되며, 그의 납석 및 녹니석은 상당량, 그리고 황철석, 금홍석, 방해석, 백운석 및 능철석은 극소량 포함된다. 중국의 24,000석탄의 광물질에는 석영, 방해석, 백운석 등이 다량 함유되며, 그의 녹니석, 백운모, 견운모, 일라이트 및 카오리나이트는 상당량, 그리고 황철석 및 금홍석은 극소량 포함된다. 31,000석탄의 광물질에는 방해석, 카오리나이트, 석영 등이 다량 함유되며, 기타 백운모, 견운모, 일라이트 및 녹니석 등은 상당량, 그리고 금홍석, 황철석 및 백운석 등은 극소량 포함된다.

3) 장성광업소 석탄회는 중국 석탄회에 비해 Al₂O₃, K₂O, TiO₂함량이 높으나, CaO, MgO, Na₂O, Fe₂O₃, P₂O₅함량이 낮으며, MnO함량은 상호 유사하다. 이러한 주·부성분 원소의 함량 특성은 장성광업소 석탄 및 중국탄의 광물질 조성과 밀접한 관련성을 가진다. 장성광업소 석탄회와 중국 석탄회의 B, Cd, Co, Cr, Cu, Ga, Ge, Li, Pb, Zn, Zr 등의 함량은 대체로 유사하나, As, Rb와 V는 장성광업소 석탄회에 부화된다. 중국탄의 C, H, N함량은 장성광업소 석탄에 비해 높다.

4) 장성광업소 석탄의 액성한계와 소성지수가 중국탄에 비해 다소 커서, 장성광업소 석탄의 점결성이 다소 양호하게 나타난다. 장성광업소 석탄과 중국탄의 투수성은 대체로 유사하다. 장성광업소 석탄의 밀도는 중국탄에 비해 큰데, 이는 석탄의 광물질 함량 차이 때문이다.

5) 석탄의 점결성 즉, 연탄 성형능에 영향을 미치는 주 요인은 석탄내의 광물질, 특히 점토광물의 종류(예를 들면 카오리나이트, 백운모, 견운모, 일라이트, 납석)와 그 함량이다. 그리고 K₂O-Rb, TiO₂-V, As-Cu-Pb 사이에는 매우 밀접한 상호 관련성이 있다.

사 사

본 연구는 대한석탄공사 기술연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었던 '석탄 및 석탄회의 특성 규명과 활용 방안 연구'의 2차년도 연구 결과의 일부를 요약한 것이며, 연구비를 지원해 주신 기술연구소에 깊은 감사를 드립니다. 그리고 기기분석에 도움을 준 전략광물자원연구소와 시료 채취에 도움을 주신 대한석탄공사 관계자 여러분, 원고 및 도면작성에 도움을 준 청주대학교 자원공학과 이상현 조교에게 감사드립니다.

참고문헌

권순문, 박홍봉, 신방섭, 김재형, 윤정환 (1979) 저질탄의 활용을

- 위한 탄질 향상에 관한 연구. 대한광산학회지, 16권, p.65-78.
- 송태윤, 안재휴, 김주환 (1967) 무연탄을 주원료로 한 제철용 코크스의 제조 방법에 관한 연구 (제 1 보). 대한광산학회지, 4권, p.94-101.
- 송태윤, 안재휴, 김주환 (1968) 무연탄을 주원료로 한 제철용 코크스의 제조 방법에 관한 연구 (제 2 보). 대한광산학회지, 5권, p.34-38.
- 송태윤, 안재휴, 백수홍 (1971) 무연탄의 성형능에 대하여. 대한광산학회지, 8권, p.171-178.
- 이재장 (1987) 탄질 슬러지의 처리에 대한 연구. 대한광산학회지, 24권, p.52-59.
- 전용원, 서정희, 이영배, 안재휴 (1980) 저질탄 활용 및 탄질 향상 대책 (제 1 보). 대한광산학회지, 17권, p.208-214.
- 전용원, 안재휴, 전효택, 김명균, 이양원 (1984) 우리나라 석탄의 암석광물 및 지구화학적 연구. 대한광산학회지, 21권, p.23-32.
- 전용원, 김명균, 황지호, 전효택 (1991) 국내 일부 함탄층의 층서 대비 및 퇴적 환경에 대한 지구화학적 연구. 한국자원공학회지, 28권, p.212-226.
- 전용원, 이종운, 김명균 (1993) 문경탄전의 함탄층에 대한 층서 대비 및 퇴적 환경 연구. 한국자원공학회지, 30권, p.66-82.
- 전효택, 김명균 (1994) 함백 및 은성광업소 석탄의 물리적 및 지구화학적 특성에 관한 연구. 한국자원공학회지, 31권, p.565-574.
- Braja M. Das (1987) 토질공학원론 (서울대학교 토목공학과 토질공학연구실 역). 구미서관, 53p.
- Gluskoter, H.J., Shimp, N.F. and Ruch, R.R. (1981) Coal analysis, trace elements and mineral matter. Chemistry of Coal Utilization(ed. Elliott, M.A.), Wiley Interscience, 411p.

1995년 7월 18일 원고접수