

## 무연탄의 광학적 특성에 관한 연구

박철우 · 박석환\* · 현주수 · 손응권

한국에너지기술연구소 연소응용연구팀

\*한국자원연구소 석탄지질연구팀

(1993년 6월 17일 접수, 1993년 9월 17일 채택)

## A Study on the Optical Characteristics of Anthracite Coals

Cheol-Woo Park, Suk-Whan Park\*, Ju-Soo Hyun and Eung-Kwon Shon

Combustion & Engineering Lab., Korea Institute of Energy Research, Taejeon 305-343, Korea

\*Coal Geology Lab., Korea Institute of Geology, Mining and Materials, Taejeon 305-343, Korea

(Received 17 June 1993; accepted 17 September 1993)

### 요 약

국내탄 및 수입무연탄을 대상으로 maceral 및 vitrinite 반사율을 측정하였다. 또한 석탄의 화학적 특성과 광학적 특성의 상관성을 고찰하여 보았다. 국내탄 및 수입탄은 collinite와 vitrodetrinite의 vitrinite group과 semifusinite, fusinite 및 inertodetrinite의 inertinite group의 maceral로 구성되어 있는 것으로 분석되었다. 국내탄에서는 micrinite, graphinite, mottlite 및 impregnite의 존재 역시 확인되었다. 국내탄은 meta-anthracite의 석탄화도를 가지며, 수입탄은 anthracite의 석탄화도를 갖는 것으로 나타났다. Vitrinite group의 maceral이 증가할수록 휘발분 및 탄소량은 증가하였으며 inertinite group의 maceral이 증가할수록 휘발분 및 탄소량은 감소하였다. Vitrinite의 최대 반사율이 증가함에 따라 이방성도 증가하였으며, 탄소량 역시 증가하였다. 반면 휘발분 및 수소량은 감소하였다.

**Abstract**—Maceral of coal and reflectance of vitrinite have been determined for the domestic and the imported coals. Also the relationship between chemical and optical properties of coal has been investigated. The maceral of coal samples is composed of both two varieties of collinite and vitrodetrinite in vitrinite group and three varieties of semifusinite, fusinite and inertodetrinite in inertinite group. Micrinite, graphinite, mottlite and impregnite have been observed in the domestic coals. The degree of coalification for domestic coal is meta-anthracite and that of the imported coal is anthracite. As the macerals in vitrinite group is increased the amount of volatile matter and carbon increased. Also the amount of volatile matter and carbon decreased with increasing macerals in the inertinite group. As the maximum reflectance of vitrinite is increased both, the anisotropy and the carbon composition increased but, the volatile matter and hydrogen decreased.

### 1. 서 론

석탄은 오랜 지질시대를 경과해서 생성되었기 때문에 석탄화도의 차이에 의해 토탄(peat), 갈탄, 역청탄, 무

연탄 등 여러 가지 탄종으로 분류되고 있으며, 탄소, 수소, 산소를 주성분으로 하는 유기질의 고체이고 점토 광물을 주로 하는 무기물을 약간 함유하고 있다[1].

석탄을 구성하고 있는 유기물을 maceral이라 총칭하

며, 근원 식물질의 종류, 식물에서의 해당 부분, 석탄화 과정에서 경험한 환경 및 석탄화의 기간 등의 차이에 의해서 통상 3개의 maceral group과 10개 이상의 maceral로 구분되며 석탄화가 진행될 때 따라 그 종류는 점차 줄어들게 되고, 대부분 동질화 되어 간다. 석탄화(coalification)란 지하에 퇴적된 근원 식물질들이 다져(compaction)되고 계속 깊게 묻혀지고, 그리고 지하에서 일어나는 계속적인 화학반응에 의해 초기에는 토탄이 형성되고 후기에는 계속해서 갈탄, 역청탄, 무연탄 등으로 변화하는 것을 말한다. 이러한 석탄을 에너지원으로 또는 탄화수소 및 탄소재료 등의 공업원료원으로서 이용하는 경우 불균질한 고체인 석탄이 가진 구조 및 성상은 일반적으로 석탄화도가 다르면 분쇄성, 점결성, 유동성, 반사율 등 여러 가지 석탄의 성질이 틀려지며, 비록 석탄화도가 같아도 그 석탄을 구성하고 있는 미세한 조직 성분의 함유비율이 다르면 석탄의 성질 및 구조도 틀려진다[2]. 따라서 석탄의 성상을 알아 그것을 공업적으로 유효하게 이용하기 위해서는 석탄조직에 관련된 분석을 수행하는 것은 매우 중요하다고 하겠다.

석탄을 현미경적으로 연구하는 일은 석탄의 maceral 분석과 반사율의 측정에 의해 시작되며 석탄의 조직과 성질 및 성상, 구조해석, 코오크스 공업 등에 관련된 많은 연구가 수행되어 있다[3-5]. 그러나 국내탄에 대해서는 이와 관련된 연구가 거의 이루어지지 않고 있는데 이는 국내탄이 대부분 연탄제조에 사용되어 왔으며 연탄제조 이외의 공업적 원료원으로서 사용이 제한되어 석탄에 대한 관심이 낮았기 때문이다. 그러나 장기적으로 볼 때 국내탄의 신규수요처를 개발하고 이를 효과적으로 활용하기 위해서는 상기한 바와 같이 특성고찰이 선행되는 것은 필수적이며 국내탄 뿐만 아니라 수입탄을 선정하는데도 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 국내 6개탄전 및 6개국 수입무연탄을 대상으로 석탄의 maceral 분석 및 반사율을 측정하여, 각 시료탄의 구성물질 분류와 석탄화 정도를 해석하였다. 또한 석탄의 화학적 특성과 maceral group 및 석탄화도의 상관성을 고찰하여 보았다.

## 2. 실 험

### 2-1. 시료 및 기기

본 연구를 위하여 문경탄전, 정선탄전, 강릉탄전, 충남탄전, 삼척탄전, 호남탄전 및 수입무연탄(6개국)을 대상으로 하여 20개 시료를 채취하였다.

채취되어진 석탄 시료는 석탄의 maceral 분석 및 석탄화도 측정을 위하여 연마편을 제작하였다.

Maceral 분석 및 석탄화도 측정을 위하여 사용되어진

기기는 서독 Ernst Leitz회사의 Orthoplan microscope with MPV2 microphotometer와 영국 Swift회사의 automatic point counter이다.

### 2-2. Maceral 분석

석탄 maceral을 현미경으로 분석하는 방법에는 석탄을 박편(thin section)으로 만들어 투광현미경하에서 분석하는 방법과 연마편(polished section)을 만들어 반사현미경하에서 구성물질의 밝기와 형태 등으로 maceral을 구분하는 방법이 있다[6].

일반적으로 이들 두 방법중에서 후자를 이용하는 경우가 많은데 이는 전자의 경우 석탄은 빛의 흡수력이 강하여 측정용 박편의 두께가 10-12  $\mu\text{m}$  정도로 얇아야 되므로 박편 제조상에 어려움이 있는데 반하여, 후자는 maceral을 분석하면서 동시에 석탄화도를 측정할 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 후자의 방법을 이용하였다.

### 2-3. 석탄화도 측정

석탄화도 측정을 위해서 vitrinite 반사율 측정 방법을 사용하였으며, vitrinite group의 maceral중 세포구조가 없는 collinite를 선택하여 측정하였다. 반사율 측정시 사용된 표준시편은 Rmoil 4.36과 Rmoil 7.30을 사용하였다. Vitrinite 반사율은 최대 반사율(maximum reflectance,  $R_{\text{max}}$ ), 평균 반사율(mean reflectance,  $R_{\text{mean}}$ ), 최소 반사율(minimum reflectance,  $R_{\text{min}}$ )을 측정하고 최대 반사율과 최소 반사율의 차이인 이방성(anisotropy,  $R_{\text{bi}}$ )을 계산하였다. 모든 반사율 측정은 침유(immersion oil)하에서 실시되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 석탄의 구성 물질 분류

시료탄의 maceral 분석 결과는 Table 1과 같다. 시료탄의 maceral을 분류함에 있어서 국제석탄암석학회(ICCP) 분류기준을 적용할 수 있는 부분은 국제암석학회 분류기준을 그대로 사용하였으며, 역청탄에서 확인되지 않는 새로운 물질들은 Park과 Shibaoka[7]에 의해 제안된 분류기준에 의하여 분류하였다.

분석되어진 결과에 의하면 대부분의 국내탄 및 수입탄은 vitrinite group과 inertinite group의 maceral로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 국내탄의 vitrinite group의 maceral은 주로 telocollinite와 vitrodetrinite이며 desmocollinite 역시 확인되었으며, 수입탄의 vitrinite group 역시 telocollinite와 vitrodetrinite로 구성되어 있으나 주로 telocollinite maceral로 구성되어 있는 것으로

Table 1. Maceral analysis of coal samples

Sample	TC	DC	VD	SF	FU	ID	MI	GP	MT	IM	MM
MK-1			92.0								8.0
MK-2								95.0			5.0
JS-1	24.0		17.0	10.0			20.0	3.0	2.0		24.0
JS-2	33.0		14.0				5.0	6.0		8.0	34.0
GR-1			3.0				60.0				37.0
GR-2							72.0				28.0
CN-1	24.0		2.0	3.0			20.0	2.0			49.0
CN-2	19.0		13.0	14.0			9.0				45.0
SC-1	48.0		20.0	17.0	1.0	1.0					13.0
SC-2	20.5		22.0	35.5	7.5	6.0			1.0		7.5
SC-3	28.0	0.5	59.5	3.5		1.5			0.5		6.5
SC-4	48.0	8.6	4.0	28.0	3.3	2.0					6.1
HN-1	2.0							96.0			2.0
HN-2	2.5							96.5			1.0
IM-VT	98.0				0.5						1.5
IM-NK	74.0			23.0							3.0
IM-RU	45.0		20.5	1.5	1.0	14.5					1.5
IM-CH	89.0		4.5		0.5	2.0					4.0
IM-US	98.0										2.0
IM-SA	58.0		28.0		2.5	7.5					2.0

MK: Munkyeong, JS: Jeongsun, GR: Gangreung, CN: Chungnam, SC: Samcheog, HN: Honam, IM-VT: Vietnam, IM-NK: North-Korea, IM-RU: Russia, IM-CH: China, IM-US: U.S.A., IM-SA: South-Africa, TC: Telocollinite, DC: Desmocollinite, VD: Vitrodetrinite, SF: Semifusinite, FU: Fusinite, ID: Inertodetrinite, MI: Micrinite, GP: Graphinite, MT: Mottlite, IM: Impregnite, MM: Mineral matter

분석되었다. 수입탄에서는 desmocollinite는 확인되지 않았다.

국내탄 및 수입탄의 inertinite group은 주로 semifusinite 혹은 fusinite로 구성되어 있으며, 정선탄전, 강릉탄전 및 충남탄전의 석탄 시료는 micrinite를 함유하는 것으로 확인되었으며 삼척탄전 및 일부 수입탄은 inertodetrinite를 함유하고 있는 것으로 분석되었다. 수입탄은 국내탄과 비교하여 비교적 적은 양의 inertinite group의 maceral을 함유하고 있는 것으로 나타났다.

특이한 것은 수입탄에서는 전혀 확인되지 않는 graphinite, mottlite 및 impregnite를 호남탄전 및 일부 문경, 정선탄전 등의 석탄 시료들은 다량 함유하고 있다는 것이다. Graphinite, mottlite 및 impregnite는 소위 국내탄에서 그 존재가 확인되는 구성물질로 기존의 갈탄이나 역청탄의 분류기준에서는 취급되지 않는 물질로서 이들의 생성 기원과 물리·화학적 성질은 아직 밝혀지지 않았으며 단지 극심한 석탄화 과정에서 새로 생겨난 물질로 추측되며, 광학적 특성에 의해 현미경하에서 다른 maceral들과 뚜렷이 구별될 수 있을 뿐이다.

Exinite group의 maceral은 확인되지 않았는데 이는

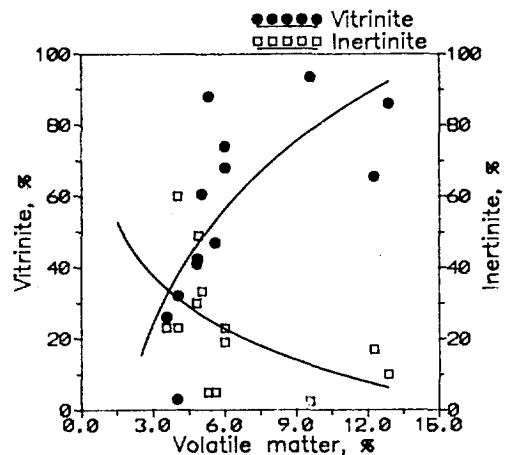


Fig. 1. Relationship between maceral groups and volatile matter.

시료탄의 경우 석탄화 과정에 의해 exinite group의 모든 특성이 파괴되어 현미경하에서 구별이 불가능한 상태인 것이다.

Fig. 1과 2는 Table 2의 시료탄의 화학적 특성과 ma-

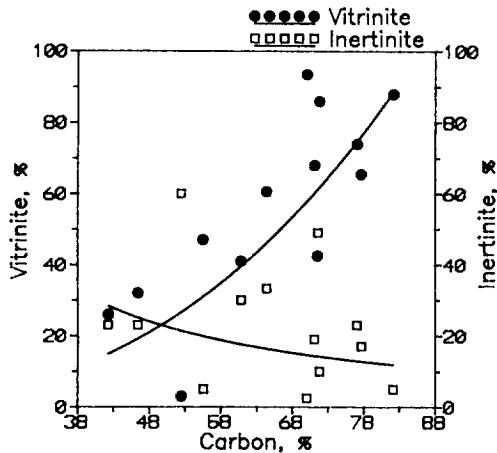


Fig. 2. Relationship between maceral groups and carbon.

Table 2. Chemical properties of coal samples

Sample	V.M.	C	H	V.M.	C	H
	As received	basis		Dry ash free	basis	
MK-1	3.56	77.68	0.67	4.19	96.52	0.84
MK-2	3.12	85.22	0.16	3.45	98.96	0.18
JS-1	4.85	60.85	0.69	7.45	95.46	1.08
JS-2	5.62	55.57	0.40	9.36	93.09	0.66
GR-1	4.01	52.45	0.39	7.13	94.21	0.71
GR-2	4.52	62.41	0.26	6.68	91.73	0.38
CN-1	3.56	42.31	0.36	7.91	97.44	0.84
CN-2	4.05	46.45	0.42	8.19	96.32	0.88
SC-1	6.00	71.12	0.96	7.84	89.95	1.21
SC-2	4.89	71.59	1.08	6.53	91.23	1.01
SC-3	5.31	82.13	1.17	6.53	94.13	1.17
SC-4	5.04	64.42	1.02	7.26	91.20	1.35
HN-1	7.23	62.70	0.40	11.00	94.44	0.60
HN-2	4.31	52.80	0.30	7.79	94.57	0.54
IM-VT	9.16	71.40	2.30	11.75	90.47	2.91
IM-NK	6.01	77.10	0.70	7.34	92.87	0.84
IM-RU	12.27	77.70	2.90	14.21	88.74	3.31
IM-CH	9.58	70.00	2.10	12.43	89.58	2.69
IM-US	8.58	64.00	1.70	11.77	86.47	2.30
IM-SA	12.87	71.80	2.70	15.86	87.91	3.31

V.M.: Volatile matter, C: Carbon, H: Hydrogen

ceral group과의 상관성을 도시하여 본 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 vitrinite group의 maceral이 증가할수록 휘발분은 증가하며 inertinite group의 maceral이 증가할수록 휘발분은 감소하는 것으로 나타나 Berkowitz[8]의 연구결과와 일치하였다. 반면, 탄소성분과 maceral group과의 사이에는 뚜렷한 상관성은 없으나 대체로 vitrinite group이 증가할수록 증가하며 inertinite

Table 3. Reflectance of coal samples

Sample	Rmax	Rmin	Rbi	Rmean
MK-1	7.02	3.46	3.56	5.32
MK-2	insufficient sample			
JS-1	6.39	2.55	3.84	4.20
JS-2	5.10	2.28	2.82	3.77
GR-1	6.29	3.37	2.92	4.65
GR-2	insufficient sample			
CN-1	7.00	3.24	3.76	5.09
CN-2	7.95	3.78	4.17	5.68
SC-1	6.50	4.77	1.73	5.66
SC-2	6.00	3.92	2.09	4.99
SC-3	6.63	3.65	2.98	5.07
SC-4	6.14	2.79	3.36	4.46
HN-1	6.79	2.97	3.82	4.85
HN-2	7.27	2.32	4.95	4.50
IM-VT	3.79	1.85	1.94	2.76
IM-NK	7.44	3.85	3.59	5.73
IM-RU	3.75	2.22	1.53	5.73
IM-CH	4.29	2.37	1.92	3.27
IM-US	3.18	2.07	1.11	3.28
IM-SA	3.17	1.64	1.53	2.41

Rmax: Maximum reflectance, Rmin: Minimum reflectance, Rbi: Anisotropy, Rmean: Mean reflectance

group이 증가할수록 감소하는 것으로 반대의 상관성을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 대상 시료탄이 함유하고 있는 inertinite group의 maceral이 산화과정에서 생성되어 보다 많은 산소를 함유함으로써 상대적으로 낮은 탄소량을 함유하고 있는 것으로 해석되어진다.

### 3-2. 석탄화도 특성

표준시편의 반사율을 측정할 때와 똑같은 전력안정 공급장치하에서 측정된 각 시료탄의 vitrinite 반사율 측정결과는 Table 3과 같다.

Teichmuller 등[9]은 석탄의 vitrinite 반사율을 측정하여 최대 반사율 2.2-2.8 범위를 semi-anthracite로, 2.8-6.0 범위를 anthracite로, 6.0-10 범위를 meta-anthracite로, 10 이상의 반사율을 graphite로 분류하였으며, 평균 반사율 2.0-2.5 범위를, semi-anthracite로 2.5-5.1 범위를 anthracite로 분류하였다.

한편 Ragot[10]는 vitrinite의 최대 반사율은 석탄화가 진행됨에 따라 점차 증가하나, 최소 반사율은 석탄화가 진행됨에 따라 증가율이 최대 반사율보다 적어지며 탄소 함량 95.5% 시점부터는 오히려 감소하는 것으로 주장하였다.

측정결과를 Techmuller 등[9]에 의해 제안된 high

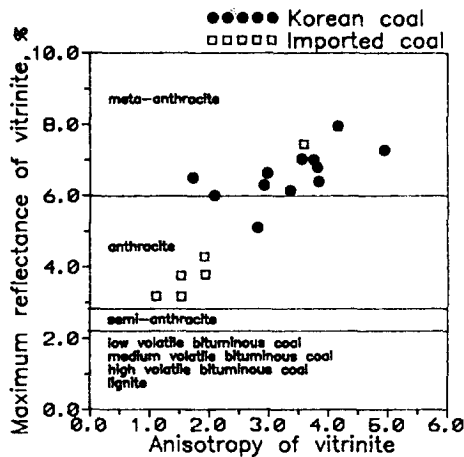


Fig. 3. Relationship between maximum reflectance and anisotropy of vitrinite.

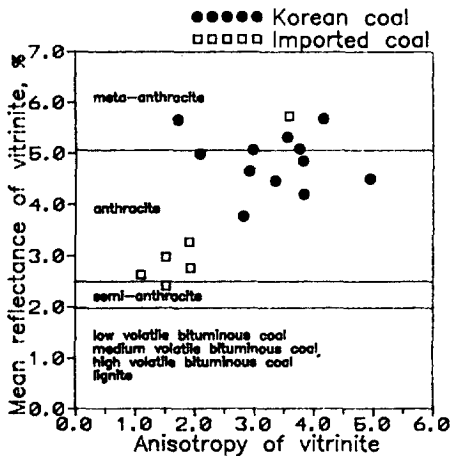


Fig. 4. Relationship between mean reflectance and anisotropy of vitrinite.

rank coal의 분류기준으로 해석하여 보면 JS-2 시료를 제외한 모든 국내탄 및 북한에서 수입된 IM-NK시료는 vitrinite 최대 반사율 6.0-7.95 범위의 값을 갖는 meta-anthracite로 판단되며, 수입탄 및 JS-2 시료탄은 vitrinite 최대 반사율 3.17-5.0사이의 값을 갖는 anthracite로 판단된다. 국내탄의 MK-2 시료 및 GR-2 시료는 이들이 함유하고 있는 maceral들이 미립의 graphinite 혹은 micrinite로 구성되어 있어 반사율 측정이 불가능하였다.

Fig. 3은 최대 반사율과 이방성과의 상관성을 도시하여 본 결과이며, Fig. 4는 평균 반사율과 이방성과의 상관성을 알아보고자 도시하여 본 결과이다. 최대 반사율과 이방성과의 사이에는 최대 반사율이 증가할수록

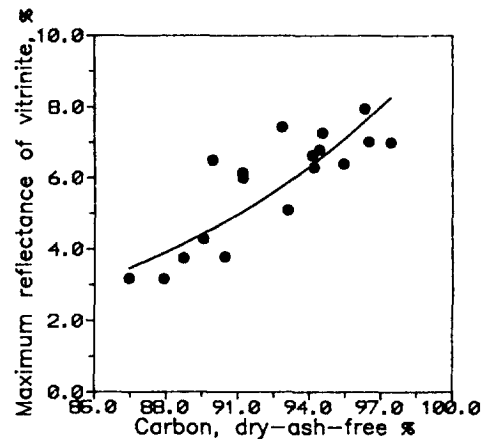


Fig. 5. Relationship between carbon and maximum reflectance of vitrinite.

이방성도 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 3에서 Y축의 최대 반사율이 석탄화도를 결정하는 변수이며 Y축 값이 증가할수록 석탄화 정도는 높으므로 vitrinite의 광학적 이방성은 석탄화가 진행됨에 따라 커지는 것을 알 수 있다. 반면, Fig. 4에서도 확인된 바와 같이 평균 반사율과 이방성과의 사이에는 특별한 상관성을 확인할 수 없었다. 이는 Ragot[10]의 연구결과와 일치하는 것으로 시료탄과 같이 석탄화 정도가 높은 석탄에서는 이방성이 뚜렷하여지므로 최소 반사율이 감소되기 시작하여 결국 평균 반사율값이 실제의 석탄화 정도 보다 낮게 측정되었기 때문이다.

따라서 vitrinite 반사율에 의한 석탄의 석탄화도 분류에 최대 반사율과 평균 반사율을 적용하고 있으나, 본 시료와 같이 석탄화 정도가 높은 석탄의 경우 평균 반사율 보다는 최대 반사율을 고려하여 석탄화 정도를 해석하는 것이 적절하다 하겠다.

Fig. 5-7은 석탄화가 진행됨에 따라 시료탄이 가지고 있는 화학적 특성의 변화를 알아보기 위하여 도시하여 본 결과이다.

통상 석탄화가 진행됨에 따라 석탄이 함유하고 있는 탄소량은 증가하는 한편 휘발분, 수소 및 산소량은 감소하는 것으로 알려져 있으며[11] 이러한 사항은 본 연구의 결과와 매우 잘 일치하고 있다.

Fig. 5의 경우 석탄화 정도의 척도인 vitrinite의 최대 반사율이 증가함에 따라 시료탄의 탄소량도 증가하는 것을 알 수 있으며, Fig. 6과 7은 vitrinite 최대 반사율이 증가함에 따라 휘발분과 수소량은 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 시료탄중 비교적 탄화정도가 낮은 수입탄은 국내탄 보다 상대적으로 많은 양의 휘발분과

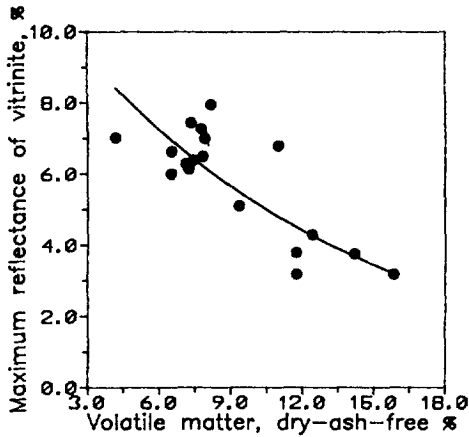


Fig. 6. Relationship between volatile matter and maximum reflectance of vitrinite.

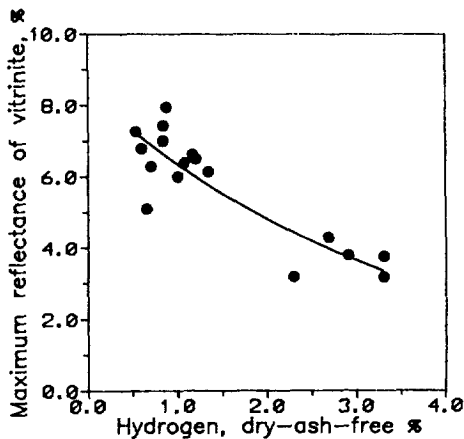


Fig. 7. Relationship between hydrogen and maximum reflectance of vitrinite.

수소함유를 갖고 있는 반면 수입탄 보다 석탄화 정도가 높은 국내탄은 탄소 함유량이 지배적이라 할 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) 국내탄 및 수입탄의 maceral중 vitrinite group은 telocollinite와 vitrodetrinite로 구성되어 있으며, 국내탄에서는 desmocollinite 역시 확인되었다. Inertinite group의 maceral은 semifusinite, fusinite 및 inertodetrinite로 구성되어 있으며 일부 국내탄에서는 micrinite가 확인되었다.

(2) 호남탄전, 문경탄전 및 정선탄전 등의 시료에서는 수입탄에서 확인되어 지지 않은 새로운 물질인 graphinite, mottlite 및 impregnite의 존재가 확인되었다.

(3) Vitrinite group의 maceral이 증가할수록 휘발분과 탄소성분은 증가하였고, inertinite group의 maceral이 증가할수록 휘발분과 탄소성분은 감소하였다.

(4) 국내탄은 최대 반사율 6.0-7.95 범위의 값을 갖는 meta-anthracite로 측정되었고, 수입탄 및 정선탄전의 JS-2 시료는 3.17-5.0 범위의 값을 갖는 anthracite로 측정되었다.

(5) 국내탄 및 수입탄은 매우 큰 광학적 이방성을 가지고 있는 것으로 나타났으며 이방성이 증가함에 따라 평균 반사율 보다는 최대 반사율이 석탄화 척도와 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다.

(6) 석탄화 정도가 높을수록 석탄의 화학적 특성인 탄소량은 증가하는 한편 휘발분과 수소량은 점차 감소하였다.

#### 감 사

본 연구는 동력자원부의 출연과제 연구비의 지원에 의해 이루어진 결과의 일부이며, 많은 조언을 하여주신 이시훈 박사님께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Wen, C. Y. and Stanley, E.: "Coal Conversion Technology", p. 1-25, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.(1979).
- Stach, E.: "Coal Petrology", p. 38-88, Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart(1982).
- Creaney, S., Pearson, D. E. and Marconi, L. G.: *Fuel*, **59**, 438(1980).
- Kisch, H. J.: *J. Geol. Soc.*, **137**(3), 271(1980).
- Montano, P. and Granoff, B.: *Fuel*, **59**, 214(1980).
- Francis, T. C. T.: "Analytical Methods for Coal and Coal Products", Vol. 1, p. 4-6, Academic Press, New York(1978).
- Park, S. W. and Shibaoka, M.: UNDP Program, ROK 1821029, KIER, p. 1-69(1987).
- Berkowitz, N.: "An Introduction to Coal Technology", p. 25, Academic Press(1979).
- Teichmüller, M., Teichmüller, R. and Bartenstein, H.: *Fortsch. Geol. Cheinld. u. Westf.* **27**, p. 137-170, Krefeld(1979).
- Ragot, J. P.: Diss. Univ. P. Sabatier, Toulouse, p. 150(1977).
- Richard, C. N.: "Chemistry of Coal Utilization", p. 133-135, John Wiley & Sons, Inc.(1981).