

국내탄의 석탄암석학적 특성

박홍수* · 박석환*

Coal Petrological Characteristics of Korean Coal

Hong Soo Park and Suk Whan Park

Abstract: In order to make economic and geological evaluation of coal in Korea, proximate and ultimate analyses were carried out as well as coal petrological studies such as maceral analyses, vitrinite reflectance and sporinite fluorescence measurement. The coefficient of correlation between each factor of both conventional utilization and coal petrological parameters were studied as in Table 5 and 6. Their conclusions were as follow: (1) for anthracite, the good parameters of coal rank are mean vitrinite reflectance, carbon content, hydrogen content and H/C atomic ratio; (2) for brown coal and sub-bituminous coal, the good parameters of coal rank are carbon content, calorific value, moisture content, hydrogen content, oxygen content and O/C atomic ratio as well as vitrinite reflectance and sporinite fluorescence. An attempt is made to infer the coal-forming environment by utilization of coal petrological analyses and to make comparison of coal analyses with proximate and ultimate analyses throughout the island arc region including Japan, Philippine and Indonesia and continental region including USA, Canada and Australia. As a result, maceral composition of Paleozoic and Mesozoic anthracite are similar to that of the Paleozoic continental coals, which were formed under dry conditions or low water table, but the coalification degree suddenly increased during Daebo orogeny (middle Jurassic to lower Cretaceous). The Tertiary coal resembles those of Tertiary island arc region coal characterized by higher calorific value, volatile matter content and H/C atomic ratio and by the formation of coal under wet conditions or higher water table.

서론

국내탄은 고생대, 중생대 및 신생대의 각 지층으로부터 산출된다. 국내탄에 대한 지금까지의 연구는 탄전 및 그 주변지역의 지질 및 지질구조의 해석을 주로하는 매장량 파악을 주 목적으로해, 탄질에 관해서는 발열량과 공업분석을 해왔을 뿐이다. 이것은 국내탄의 경우 산출하는 석탄의 대부분이 무연탄이므로 거의가 일반연료로써 밖에 사용되지 않았기 때문이다. 최근 해외에서는 석탄의 유효이용에 따른 석탄의 성질을 다각적으로 분석하는 연구가 널리 행해져, 발열량, 공업분석, 원소분석 등에 의한 석탄의 특성파악 이외에도 석탄암석학을 응용하여 석탄

미세조직 성분분석 및 미세조직 성분인 비트리나이트(vitrinite)의 반사율 측정에 의한 새로운 탄질특성 평가법이 지질학적 구조해명, 탄전생성시의 고환경 추정, 탄전 개발의 평가 뿐만 아니라 코오코스 공업에서의 수입탄의 품질관리, 석탄의 액화, 가스화 등에도 적극적으로 응용되어 기술 개선에 공헌하고 있다. 석탄의 탄질 특성은 석탄화도 및 미세조직 성분 조성에 의해 결정된다. 일반적으로 석탄화도가 다르 면 석탄의 모든 성질은 다르며, 석탄화도가 동일하더라도 그 석탄을 구성하고 있는 미세조직 성분의 구성 정도가 틀리게 되면 성질은 달라지게 된다. 현재 비트리나이트 반사율은 석탄화도를 결정하는데 있어서 가장 신뢰성 있는 지표로 알려져 있으며, 근년 미세조직 성분인 스포리나이트(sporinite)의 형광성도 비트리나이트 반사율의 보조적인 지표로써 실용적 평가를 얻고 있다. 본 논문에서는 국내의 각

*한국동력자원연구소 (Korea Institute of Energy and Resources, P.O. Box Gurogu 98, Seoul, 152-600, Korea)

지질시대에서 산출되는 석탄시료에 대해 발열량, 공업분석, 원소분석, 비트리나이트 반사율 측정, 스포리나이트 형광성 측정 및 석탄조직 성분분석을 행해, 이러한 모든 분석 결과간의 상관관계를 조사해, 탄종별로 석탄의 성질을 가장 잘 표현하는 탄질평가지표를 확립했다. 또한 국내탄과 일본, 필리핀, 인도네시아, 캐나다, 미국 및 호주탄을 석탄암석학적으로 비교 검토해 국내탄의 석탄 생성 당시의 고환경을 추정함과 동시에 국내탄의 일반적인 탄질 특성을 밝혔다.

시 료

국내 탄전은 대부분이 육천지향사대 내의 강릉-해남선을 따라서 북동-남서방향으로 분포하며, 그 외의 지역에도 소규모로 존재한다. 석탄은 대부분이 무연탄으로, 그 대부분이 고생대말의 평안계 및 이에 대비되는 변성퇴적암류, 중생대초 또는 중기의 대동계 중에 부존하며 백악기의 경상계 하부 지층에도 소량 존재한다. 또한 북평, 영덕 및 경주지역에 분포하고 있는 제 3기 퇴적층에도 석탄이 부존되어 있다. 금번 채취한 시료는 고생대의 삼척탄전의 강원탄광(시료번호: G-1), 장성광업소(J-4, 5, 7, 8), 중생대의 문경탄전(M-2, 3, 4), 충남탄전(D-1, 4), 신생대의 경주, 영일탄전의 경주지구(L-1), 장기지구(L-2), 도구지구(L-3), 북평탄전(L-4), 영덕탄전(L-5, 6, 7, 8)의 석탄이다(Fig. 1).

시료작성 및 분석, 측정방법

시료의 발열량 측정, 공업분석 및 원소분석은 JIS 규정에 의해 시료 조제해 분석을 했다. 여기서는 석탄조직분석, 비트리나이트 반사율 측정, 스포리나이트 형광성 측정방법을 설명한다.

연마시료작성

석탄시료는 연마시료를 작성한 후 평활하고 상처가 없는 표면으로 연마한다. 우선, 석탄시료는 축분해서 약 10g을 과분쇄가 되지 않도록 20 mesh 이하로 분쇄한다. 분쇄된 시료 약 2g을 분말수지와 1:1로 혼합하여 가압, 가열해 직경 3cm, 높이 1cm 정도의 원기둥형의 연마시료를 작성한다. 작성된 연마

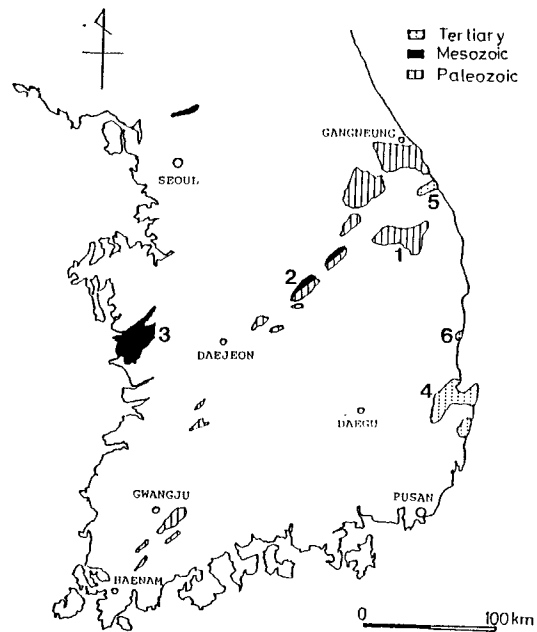


Fig. 1. Distribution of coalfields.

1. Samcheong 2. Mungyeong 3. Chungnam
4. Gyeongju-Yeongil 5. Bugpyeong 6. Yeongdeog

시료는 연마지 800#, 1200#의 순서로 물로 연마한 후, 연마포에서 연마용 알루미늄을 사용해서 연마했다.

분석 및 측정방법

석탄조직분석과 스포리나이트 형광성 측정은 서독 Zeiss 현미경 POL 01k 를, 비트리나이트 반사율 측정은 서독 Leitz 현미경 MPV-2 compact 를 사용했다. 또한 모든 분석, 측정은 immersion oil(n=1.518)에 의한 유침하에서 행해졌다.

석탄조직분석

연마시료 1개에 대해 500점 이상의 관찰을 하고 ICCP(International Committee for Coal Petrology : 국제석탄조직위원회) 국제분류를 적용하여 분류했다(Table 1).

비트리나이트 반사율 측정

표준물질은 서독 Klein and Becker 의 YTTR-IUM-ALUMINIUM-GARNET(반사율: 0.900 및 1.

Table 1. Maceral classification of brown coals and bituminous coals (International Handbook of Coal Petrography 1971, 1975).

| Brown Coal-Lignite | | | Bituminous Coal-Anthracite | | | | |
|--------------------|------------------|-----------------|--|---------------------------------|----------------|---------------|---------|
| Maceral Group | Maceral Subgroup | Maceral | Maceral Type | Maceral Type | Maceral | Maceral Group | |
| Huminite | humotelinite | textinite | texto-ulminite eu-ulminite | telinite 1 | telinite | Vitrinite | |
| | | ulminite | | telinite 2 | | | |
| | humodetrinite | attrinite | levigelinite detrogelinite telogelinite eugelinite | desmocollinite telocollinite | vitrodetrinite | | |
| | | densinite | | | | | |
| | humocollinite | gelinite | porigelinite phlobaphinite pseudo-phlobaphinite | gelocollinite corpocollinite | | | |
| | | corpo-huminite | | | | | |
| | | | | | | | |
| | Exinite | | sporinite | | | | Exinite |
| | | | cutinite | | | | |
| | | | resinite | | | | |
| | | alginate | | | | | |
| | | suberinite | | | | | |
| | | liptodetrinite | | | | | |
| Inertinite | | micrinite | | | Inertinite | | |
| | | macrinite | | | | | |
| | | sclerotinite | | | | | |
| | | semifusinite | | | | | |
| | | fusinite | | | | | |
| | | inertodetrinite | | | | | |

689)를 써서 1개의 연마시료 중 telocollinite 만 골라 50점 이상을 측정해 그 평균값을 가지고 그 시료의 반사율로 했으며, 이방성을 갖는 시료에 대해서는 최소반사율 및 최대반사율을 측정해 그 평균반사율을 구하였다. 또한 갈탄에 있어서는 휴미나이트군에서 평활한 면을 가진 조직성분만 골라 측정하였다.

구하였다(λ_{max}). 또한 500 nm 과 650 nm 때의 형광 파장의 비를 Spectral Quotient (Qs) 값 (Ottenjahn 외, 1973)으로 했다. 1개의 연마시료에 대해 12점 측정을 하여 최소치와 최대치를 제외하고 남은 측정치의 평균을 그 시료의 최대형광파장(λ_{max}) 및 Qs 값으로 했다.

스포리나이트 형광성 측정

측정은 400-700 nm 의 가시광 영역에서 10 nm 간격으로 행해지며 각 파장에서의 형광강도를 표준 분광에 의해 구해진 보정값에 의해 보정해 형광파장을

결과 및 고찰

Table 2 에 각 시료의 지질시대, 발열량, 휘발분,

Table 2. Results of analysis and measurement of coals

| Sample no. | Age | Cal. | V.M. | H ₂ O | C | H | O | H/C | O/C | Rm | Rmax | Rmin | λ max | Qs | Fuel ratio | f _a |
|------------|-----|------|-------|------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------------|----------------|
| G-1 | P | 7984 | 3.65 | 3.8 | 96.09 | 1.56 | 1.56 | 0.193 | 0.012 | 5.58 | 6.68 | 4.48 | - | - | 26.4 | 0.970 |
| J-4 | P | 7931 | 2.82 | 7.4 | 96.72 | 1.13 | 1.59 | 0.139 | 0.012 | 5.13 | 6.29 | 3.96 | - | - | 34.5 | 0.972 |
| J-5 | P | 7971 | 3.55 | 6.9 | 95.22 | 1.14 | 1.37 | 0.143 | 0.011 | 5.40 | 7.68 | 3.12 | - | - | 27.2 | 0.980 |
| J-7 | P | 7986 | 3.41 | 1.1 | 95.73 | 1.24 | 2.02 | 0.154 | 0.016 | 6.00 | 7.78 | 4.21 | - | - | 28.3 | 0.976 |
| J-8 | P | 7847 | 4.89 | 1.1 | 95.04 | 1.57 | 2.87 | 0.197 | 0.023 | 6.20 | 8.14 | 4.25 | - | - | 19.5 | 0.969 |
| D-1 | M | 7797 | 3.67 | 8.3 | 97.31 | 0.81 | 1.62 | 0.099 | 0.012 | 4.02 | 5.26 | 2.78 | - | - | 26.2 | 0.958 |
| D-4 | M | 7890 | 2.83 | 7.1 | 97.24 | 0.79 | 1.71 | 0.097 | 0.013 | 4.79 | 7.22 | 2.35 | - | - | 34.3 | 0.967 |
| M-2 | M | 7678 | 6.33 | 3.4 | 95.18 | 1.67 | 2.04 | 0.209 | 0.016 | 4.66 | 4.90 | 4.41 | - | - | 14.8 | 0.952 |
| M-3 | M | 7900 | 3.50 | 4.5 | 95.79 | 1.16 | 1.89 | 0.145 | 0.015 | 4.51 | 4.90 | 4.12 | - | - | 27.6 | 0.975 |
| M-4 | M | 7953 | 2.63 | 4.7 | 96.71 | 0.92 | 1.45 | 0.114 | 0.011 | 4.67 | 4.90 | 4.43 | - | - | 37.1 | 0.974 |
| L-1 | T | 6773 | 51.76 | 14.3 | 70.79 | 5.90 | 21.44 | 0.993 | 0.227 | 0.44 | - | - | 587 | 1.00 | 0.9 | 0.660 |
| L-2 | T | 7971 | 49.40 | 6.8 | 79.98 | 6.23 | 11.46 | 0.928 | 0.108 | 0.56 | - | - | 619 | 1.33 | 1.0 | 0.612 |
| L-3 | T | 8029 | 51.04 | 7.7 | 78.89 | 6.51 | 11.70 | 0.983 | 0.111 | 0.54 | - | - | 616 | 1.42 | 1.0 | 0.601 |
| L-4 | T | 6312 | 57.45 | 16.2 | 68.75 | 5.65 | 24.10 | 0.979 | 0.263 | 0.31 | - | - | 562 | 0.84 | 0.7 | 0.599 |
| L-5 | T | 6560 | 49.87 | 16.9 | 70.14 | 5.10 | 23.17 | 0.866 | 0.248 | 0.27 | - | - | 575 | 0.85 | 1.0 | 0.692 |
| L-6 | T | 6601 | 51.49 | 18.7 | 70.11 | 5.23 | 21.98 | 0.889 | 0.235 | 0.32 | - | - | 572 | 0.81 | 0.9 | 0.670 |
| L-7 | T | 6624 | 52.61 | 17.7 | 70.27 | 5.22 | 21.25 | 0.885 | 0.227 | 0.31 | - | - | 581 | 0.91 | 0.9 | 0.653 |
| L-8 | T | 6340 | 58.28 | 13.4 | 67.94 | 5.85 | 23.39 | 1.026 | 0.258 | 0.28 | - | - | 588 | 1.03 | 0.7 | 0.594 |

수분, 탄소함유량, 수소함유량, 산소함유량, H/C 원자수비, O/C 원자수비, 비트리나이트 반사율, 스포리나이트 형광성 및 연료비를 나타냈다. 단, 발열량과 휘발분은 무수 무회분기(dry ash free)의 값이다. 또 Table 3, 4에 각 시료의 석탄조직 성분분석 결과를 나타내었지만, Table 3의 무연탄의 조직분석 결과에 대해서는 현재 국내 무연탄의 특성에 의해 새로운 명칭으로 불리어지고 있지만(박, 1988) 여기서는 국제분류법에 따랐다.

석탄의 종류

각 시료를 ASTM(D 388-82)에 의해 분류하면, 고생대와 중생대의 석탄은 변성무연탄에 속하며 신생대의 석탄은 대부분이 갈탄에 속하지만 장기와 도구 지구의 석탄은 아역청탄에 속한다. 이 아역청탄은 현재 연료로써 사용되고 있지만 선탄기술의 개발이 이루어진다면 원료탄 확보에 기여하리라고 생각된다.

Table 3. Maceral analysis of anthracite (m.m.f.)

| Maceral | G-1 | J-4 | J-5 | J-7 | J-8 | D-1 | D-4 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Vitrinite | 75.9 | 60.7 | 61.5 | 93.3 | 85.2 | 57.3 | 42.1 |
| Vitrodetrinite | 5.6 | 4.2 | | | 8.9 | 14.0 | 6.6 |
| Telocollinite | 70.3 | 56.5 | 61.5 | 93.3 | 76.3 | 43.3 | 35.5 |
| Inertinite | 24.1 | 39.2 | 38.5 | 6.7 | 14.8 | 42.7 | 57.9 |
| Semifusinite | 24.1 | 39.2 | 38.5 | 6.7 | 14.8 | 42.7 | 57.9 |

석탄 조직성분조성

무연탄의 조직성분조성

Table 3과 같이 무연탄의 조직성분조성은 비트리나이트군과 이너티나이트군으로 구성되어 있으며 비트리나이트군은 대부분이 telocollinite이며 이너티나이트군은 semifusinite로 구성되어 있다. 석탄화도가 진행되어 무연탄단계가 되면 비트리나이트와 이너티나이트는 서로 구별하기 어렵지만 semifusinite는 광

Table 4. Maceral analysis of sub-bituminous coal and lignite (m.m.f.)

| Maceral | L-1 | L-4 | L-5 | L-6 | L-7 | L-8 | L-2 | L-3 | Maceral |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------|
| Huminite | 91.1 | 95.6 | 99.1 | 98.3 | 98.7 | 94.7 | 94.7 | 87.6 | Vitrinite |
| Humotelinite | 36.9 | 27.8 | 64.1 | 27.0 | 23.0 | 38.5 | | | |
| Textinite | | | | | 0.3 | | | | |
| Texto-ulminite | 15.6 | 15.0 | 46.2 | 18.9 | 10.9 | 31.2 | 28.4 | 40.3 | Telinite |
| Eu-ulminite | 21.3 | 12.8 | 17.9 | 8.1 | 11.8 | 7.3 | | | |
| Humodetrinite | 30.5 | 28.6 | 3.0 | 34.0 | 18.3 | 11.9 | | | |
| Attrinite | 1.7 | | | | | | 28.7 | 17.9 | Vitrodetrinite |
| Densinite | 28.8 | 28.6 | 3.0 | 34.0 | 18.3 | 11.9 | 8.5 | 5.4 | Desmocollinite |
| Humocollinite | 23.7 | 39.2 | 32.0 | 37.3 | 57.4 | 44.3 | | | |
| Detrogelinite | 3.1 | 3.6 | 3.7 | 8.8 | 4.2 | 3.3 | | | |
| Telogelinite | 3.7 | 13.5 | 0.6 | 6.0 | 2.9 | 2.6 | 11.4 | 2.6 | Telocollinite |
| Eugelinite | 10.5 | 9.6 | 21.6 | 7.4 | 20.8 | 19.2 | | | |
| Porigelinite | 1.7 | 1.4 | 4.3 | 0.7 | 1.9 | 1.3 | 9.2 | 16.6 | Gelocollinite |
| Phlobaphinite | 4.7 | 11.1 | 1.8 | 14.4 | 27.6 | 17.9 | 8.5 | 4.8 | Corpocollinite |
| Exinite | 8.2 | 2.5 | 0.3 | 1.4 | 1.3 | 2.0 | 4.1 | 10.5 | Exinite |
| Sporinite | 5.1 | | | | | | 0.6 | 1.9 | Sporinite |
| Cutinite | | | | 0.7 | 0.3 | | 3.2 | 7.3 | Cutinite |
| Resinite | | 0.4 | | | | | 0.3 | 1.3 | Resinite |
| Suberinite | 3.1 | 2.1 | 0.3 | 0.7 | 1.0 | 2.0 | | | |
| Inertinite | 0.7 | 1.9 | 0.6 | 0.3 | | 3.3 | 1.2 | 1.9 | Inertinite |
| Semifusinite | 0.7 | 1.1 | 0.3 | | | 2.6 | 0.3 | 1.0 | Semifusinite |
| Fusinite | | | | | | | | | Fusinite |
| Sclerotinite | | 0.4 | | | | | | 0.3 | Sclerotinite |
| Inertodetrinite | | 0.4 | 0.3 | 0.3 | | 0.7 | 0.9 | 0.6 | Inertodetrinite |

학적 이방성을 갖고 있으므로 stage 를 회전시키면 세포조직을 식별할 수가 있다. 다른 조직성분은 fusinite 와 sclerotinite 가 극소량 존재한다. 한편, 엑시나이트군은 무연탄단계에서는 비트리나이트화하여 조직성분을 식별하기 어렵지만 cross nicol 하에서 관찰하면 그 잔해를 확인할 수도 있다. 또 중생대 석탄 중 문경탄전의 석탄은 입자의 직경이 10 μm 로 심하게 파쇄되어 있어 조직성분의 판별이 불가능하였다. 이러한 것들이 분진의 원인이 되리라고 생각된다.

아역청탄의 조직성분조성

Table 4 와 같이 조직성분의 조성은 갈탄과 거의 차이가 없다. 그러나 조직성분의 형태의 차이는 확

인할 수 있으며 비트리나이트군이 90% 정도 포함된 것이 특징이다. 또한 아역청탄의 vitrodetrinite 에는 엑시나이트군이 다량 함유되어 일본의 제 3기 역청탄에 특징적으로 포함되는 degradinite 와 아주 흡사한 형태를 갖고 있다.

갈탄의 조직성분조성

갈탄에 포함되어 있는 조직성분은 복잡하고 그 수도 많다. 특히 sclerotinite 는 일실에서 다실, 또는 집합체로써 그 형태가 다양하다. 갈탄의 조직성분조성은 대부분이 휴미나이트군으로 90% 이상을 차지하며 엑시나이트군은 0.3-8.2%, 이너티나이트군은 0-3.3%로 휴미나이트군이 아주 많은 것이 특징이다.

Table 5. The coefficients of correlation between results of analysis and measurement of anthracite

| | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----------------|--|
| Cal. | = | | | | | | | | | | | | | |
| V.M. | -0.733 | = | | | | | | | | | | | | |
| H ₂ O | -0.023 | -0.448 | = | | | | | | | | | | | |
| C | 0.108 | -0.658 | 0.675 | = | | | | | | | | | | |
| H | -0.243 | 0.757 | -0.701 | -0.799 | = | | | | | | | | | |
| O | -0.383 | 0.582 | -0.712 | -0.524 | 0.544 | = | | | | | | | | |
| H/C | -0.246 | 0.762 | -0.706 | -0.813 | 1.000 | 0.551 | = | | | | | | | |
| O/C | -0.300 | 0.589 | -0.737 | -0.585 | 0.570 | 0.997 | 0.579 | = | | | | | | |
| Rmean | 0.444 | 0.097 | -0.677 | -0.581 | 0.548 | 0.493 | 0.550 | 0.528 | = | | | | | |
| Rmax. | 0.434 | -0.088 | -0.292 | -0.307 | 0.165 | 0.339 | 0.168 | 0.365 | 0.838 | = | | | | |
| Rmin. | 0.064 | 0.324 | -0.720 | -0.526 | 0.707 | 0.310 | 0.705 | 0.329 | 0.378 | -0.189 | = | | | |
| F.R. | 0.668 | -0.960 | 0.466 | 0.701 | -0.762 | -0.610 | -0.768 | -0.623 | -0.183 | -0.034 | -0.274 | = | | |
| f _a | 0.901 | -0.650 | -0.090 | -0.141 | -0.196 | -0.216 | -0.189 | -0.165 | 0.459 | 0.435 | -0.090 | 0.549 | = | |
| | Cal. | V.M. | H ₂ O | C | H | O | H/C | O/C | Rmean | Rmax. | Rmin. | F.R. | f _a | |

Cal.: Calorific value V.M.: Volatile matter F.R.: Fuel ratio f_a: Aromaticity

탄질평가의 지표

석탄의 성질을 평가하는 지표 가운데 석탄화도의 지표로써는 비트리나이트 반사율이 있으며, 근년, 저석탄화도탄에 있어서는 스포리나이트 형광성이 비트리나이트 반사율의 보조적인 지표로써 실용적 평가를 얻고 있다. 공업적 성질을 표현하는 지표로써는 발열량, 휘발분, 수분 및 연료비가 있으며, 화학적 성질을 표현하는 지표로써는 수소함유량, 산소함유량, H/C 원자수비, O/C 원자수비 및 방향족 탄소지수가 있다. 또한 이것들과는 별도로 석탄조직성분은 동일석탄화도탄의 경우에는 그 탄질특성과 상관을 갖고 있다.

무연탄의 탄질평가지표

Table 5에 각 지표간의 상관계수를 나타냈다. 우선, 석탄화도의 지표로써는 비트리나이트의 평균반사율과 탄소함유량이 그밖의 탄질특성을 나타내는 지표들과 단상관이 비교적 좋으며, 발열량과의 단상관은 나쁘다. 다음에 탄질의 공업적 성질을 나타내는 지표로써는 수분과 연료비가 비교적 좋지만, 발열량은 공업적, 화학적 성질의 지표와도 상관이 무척 나쁘며 휘발분은 비교적 좋다. 탄질의 화학적 성질을 표현하는 지표로써는 수소함유량 및 H/C 원자

수비가 비교적 좋으며, 산소함유량, O/C 원자수비 및 방향족 탄소지수는 나쁘다. 이상과 같이 무연탄에 있어서는, 탄질평가지표 중에서 석탄화도의 지표로써는 비트리나이트 반사율과 탄소함유량이 좋고, 공업적 성질을 나타내는 지표로써는 휘발분, 수분 및 연료비가, 화학적 성질을 나타내는 지표로써는 수소함유량과 H/C 원자수비가 좋다고 할 수 있다. 그러나, 발열량, 산소함유량, O/C 원자수비 및 방향족 탄소지수는 무연탄에 있어서의 탄질평가지표로써는 부적당하다.

아역청탄 및 갈탄의 탄질평가지표

Table 6에 각 지표간의 상관계수를 나타냈다. 우선, 석탄화도의 지표인 탄소함유량은 비트리나이트 반사율, 스포리나이트 형광성 양쪽과 매우 좋은 상관을 갖고 있는 것을 알 수 있다. 그 상관계수는 0.929와 0.902로 좋은 정상관계를 갖는다. 또 비트리나이트 반사율의 보조적인 지표로써 실용적 평가를 받고 있는 스포리나이트 형광성은 국내의 신생대 석탄에 있어서는 매우 좋은 상관을 갖는다. 탄소함유량, 비트리나이트 반사율 및 스포리나이트 형광성은 그밖의 탄질특성을 나타내는 지표들과도 높은 상관을 갖는 매우 좋은 지표가 될 수 있다. 이것들은 특히 수분과 상관이 높으며 휘발분과는 상관이 나쁘

Table 6. The coefficients of correlation between results of analysis and measurement of lignite and sub-bituminous coals

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----------------|
| Cal. | = | | | | | | | | | | | | |
| V.M. | -0.608 | = | | | | | | | | | | | |
| H ₂ O | -0.881 | 0.256 | = | | | | | | | | | | |
| C | 0.994 | -0.622 | -0.871 | = | | | | | | | | | |
| H | 0.759 | -0.032 | -0.925 | 0.725 | = | | | | | | | | |
| O | -0.994 | 0.560 | 0.887 | -0.990 | -0.764 | = | | | | | | | |
| H/C | 0.046 | 0.619 | -0.424 | -0.007 | 0.683 | -0.058 | = | | | | | | |
| O/C | -0.997 | 0.587 | 0.877 | -0.993 | -0.751 | 0.999 | -0.036 | = | | | | | |
| Rmean | 0.939 | -0.516 | -0.876 | 0.929 | 0.843 | -0.929 | 0.238 | -0.932 | = | | | | |
| λ max. | 0.925 | -0.452 | -0.934 | 0.902 | 0.814 | -0.934 | 0.230 | -0.928 | 0.877 | = | | | |
| Qs | 0.923 | -0.320 | -0.970 | 0.895 | 0.909 | -0.930 | 0.369 | -0.921 | 0.888 | 0.969 | = | | |
| F.R. | 0.611 | -0.999 | -0.271 | 0.626 | 0.035 | -0.562 | -0.618 | -0.588 | 0.509 | 0.462 | 0.328 | = | |
| f _a | -0.308 | -0.561 | 0.611 | -0.300 | -0.728 | 0.364 | -0.747 | 0.334 | -0.354 | -0.401 | -0.557 | 0.554 | = |
| | Cal. | V.M. | H ₂ O | C | H | O | H/C | O/C | Rmean | λ max. | Qs | F.R. | f _a |

Cal.: Calorific value V.M.: Volatile matter F.R.: Fuel ratio λ max.: Fluorescence Qs: Spectral Quotient

다. 저석탄화도탄에서의 비트리나이트 반사율과 휘발분의 상관성이 안좋은 것은 이미 지적되어 있다 (McCartney 외, 1972). 공업적 성질의 지표에서는 발열량은 수분과 상관성이 좋으며 수소함유량, 산소함유량, O/C 원자수비와도 상관성이 좋다. 휘발분은 거의 대부분의 지표들과 상관성이 나쁘다. 이상과 같이 아역청탄 및 갈탄에 있어서는, 탄질평가의 지표 가운데 석탄화도의 지표로는 비트리나이트 반사율, 스포리나이트 형광성, 탄소함유량이 좋으며, 탄질의 공업적 성질을 나타내는 지표로는 발열량과 수분이 좋고, 탄질의 화학적 성질을 나타내는 지표로는 수소함유량, 산소함유량, O/C 원자수비가 좋다. 단, 휘발분과 H/C 원자수비는 아역청탄 및 갈탄의 탄질 평가지표로는 부적합하다.

외국탄과의 비교

여기서 대상으로한 외국탄은 일본, 필리핀 및 인도네시아의 도호탄과 미국, 캐나다 및 호주의 대륙탄이며, 탄종은 역청탄, 아역청탄 및 갈탄이다.

퇴적환경

석탄조직의 비트리나이트군, 엑시나이트군, 이너티나이트군의 물리, 화학적 성질은 서로 틀리다. 그

의 차이에 의한 것이다. 또한 생성환경에 의해 조직 성분조성이 틀려지기 때문에, 역으로 조직성분조성을 파악함으로써 석탄생성 당시의 고환경을 추정할 수 있다 (Shibaoka 외, 1975; Marchioni, 1980).

Fig. 2는 도호탄과 대륙탄의 조직성분조성의 3각 diagram 위에 국내탄의 조직성분조성을 삽입한 것이다. 페름기의 호주석탄은 이너티나이트군이 많고 엑시나이트군이 적어 이러한 석탄은 건조한 기후 또는 것은, 근원식물의 차이, 보존상태 또는 생성환경 등

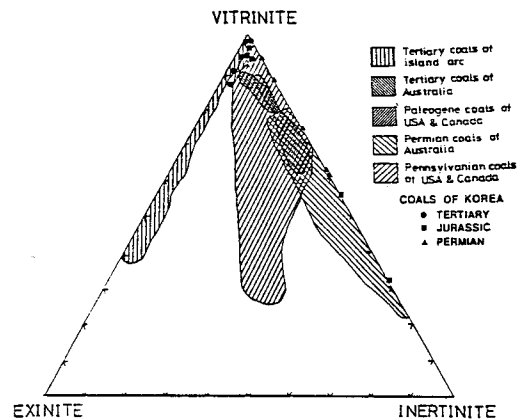


Fig. 2. Maceral composition of coals in island-arc region, continental region and Korea.

지하수위 (water table level)가 낮은 환경하에서 니타인이 형성되었다고 추정할 수 있다 (Strauss 외, 1976; Stach 외, 1982).

Pennsylvanian의 미국, 캐나다의 석탄은 이너티나이트군이 적고, 소량의 엑시나이트군을 포함하며 비트리나이트군이 많은 것이 특징으로 이러한 석탄은 페름기의 호주석탄에 비해서 습윤 또는 지하수위가 높은 환경이었을 것으로 추정된다. 또, 제 3기의 호주석탄은 페름기의 호주석탄에 비해 비트리나이트군이 많고 엑시나이트군이 적어, 이것은 제 3기의 석탄은 페름기의 석탄에 비해 습윤 또는 지하수위가 높은 환경하에서 생성되었다고 추정할 수 있다. 고제 3기의 미국석탄은 pennsylvanian의 석탄에 비해 엑시나이트군이 적어, 이것은 pennsylvanian보다 고제 3기가 전조기후 또는 지하수위가 낮았을 것으로 추정된다. 또한, 제 3기의 도호탄은 비트리나이트군이 많고, 소량의 엑시나이트군을 포함하며 이너티나이트군이 거의 없어, 이것은 보다 습윤 또는 지하수위가 높은 환경하에서 생성되었다고 말할 수 있다.

한편, 국내의 고생대 및 중생대의 석탄은 엑시나이트군이 비트리나이트화되어 조성의 비교를 확실하게 할 수 없지만, 고생대의 석탄은 비트리나이트군이 많고, 이너티나이트군은 6.7%~39.2% 정도, 중생대의 석탄은 비트리나이트군과 이너티나이트군을 약 50%씩 포함해 중생대의 석탄이 고생대의 석탄보다 전조기후 또는 지하수위가 낮은 환경하에서 생성되었으리라고 생각된다. 또 국내의 제 3기 석탄은 대부분이 비트리나이트군 또는 휴미나이트군으로 제 3기의 일본, 필리핀, 인도네시아의 도호탄 영역으로 들어간다. 이것은, 제 3기의 국내탄의 퇴적 당시의 한반도와 일본열도의 고환경은 유사했다는 것을 말해준다. 또한 이것은 국내탄에 포함되어 있는 조직성분이 일본탄에 포함되어 있는 degradinite와 흡사하다는 것을 뒷받침 해주며 생성환경은 습윤 또는 지하수위가 높았을 것으로 예상된다. Degradinite는 일본탄에만 존재한다고 알려져 있는데 지금까지의 대부분의 외국 유연탄은 고생대 또는 중생대의 석탄이 개발되어 쓰여진 반면 일본탄은 제 3기의 석탄으로 양자는 석탄화도는 거의 비슷하나 석탄의 근원물질이 달라 조직성분이 전혀 틀렸기 때문이었다. 그러나 최근 외국에서도 석탄화도가 낮은 제 3기의 석탄을 사용하게 됨에 따라 degradinite의 존재가 보고되어 있어 (Stach *et al.*, 1982), degradinite는 제 3기의 식물과 관계가 있을 것으로 생각된다.

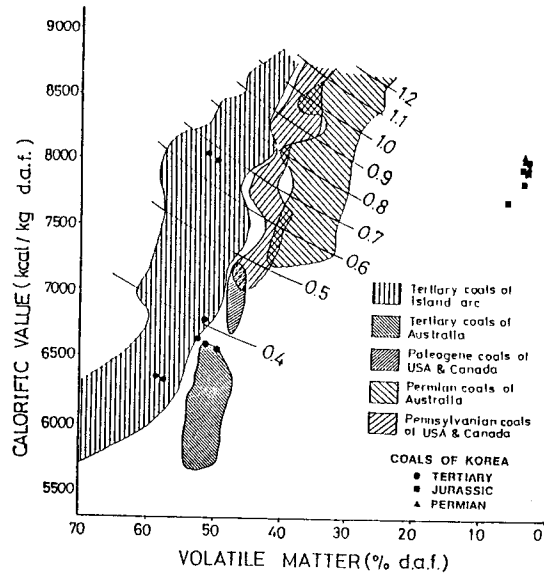


Fig. 3. Coal properties of island-arc region, continental region and Korea.

공업적 성질

석탄 조직성분조성과 발열량 및 휘발분의 관계는 석탄의 성질을 아는데 중요하다. 일반적으로 석탄화도가 진행되면 휘발분은 감소하고, 비트리나이트 반사율 및 발열량은 증가하지만 무연탄 단계가 되면 발열량은 역으로 감소한다 (키무라의, 1976).

도호탄과 대륙탄의 휘발분, 발열량 및 비트리나이트 반사율 관계에 국내탄의 분석결과를 삽입했다 (Fig. 3). 우선, 발열량과 휘발분의 관계는 등비트리나이트 반사율에 직교해가며 변화하는 것을 알 수 있다. 또, 페름기의 호주 석탄은 이너티나이트가 많기 때문에 동일 석탄화도탄에 비해서 발열량, 휘발분이 낮다. 제 3기의 도호탄은 동일 석탄화도탄에 비해 발열량, 휘발분이 높는데, 이것은 degradinite 또는 엑시나이트군의 함유 때문으로 생각된다. 한편, 국내의 고생대와 중생대의 석탄은 서로 차이가 보이지 않고 좁은 범위에 집중한다. 이 위치는 사사키 (1959)에 의한 일본의 무연탄보다도 발열량, 휘발분이 낮으며, pennsylvanian의 미국, 캐나다의 석탄과 페름기의 호주석탄에 비교해도 휘발분이 매우 낮다. 이것은 국내의 석탄은 매우 석탄화도가 높은 것을 의미한다. 또한, 고생대와 중생대의 석탄이 조직성분조성에 의한 차가 없는 것은 석탄화도가 높기 때

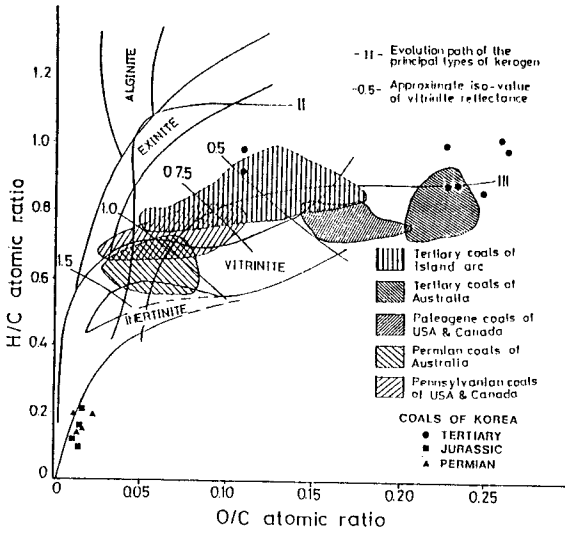


Fig. 4. Chemical properties of island-arc region, continental region and Korea.

문인 것으로 생각된다. 한편, 국내의 아역청탄은 동일 석탄화도탄에 비해 발열량, 휘발분이 높다. 일본탄이 동일 석탄화도의 외국탄에 비해 발열량, 휘발분이 높은 것으로 나타나는데 이것은 degradinite의 존재에 의한 것으로 밝혀져(후지이, 1980), 국내 아역청탄도 degradinite와 비슷한 조직성분의 존재에 의한 영향으로 생각되지만, 차후 이 조직의 근원과 특성을 밝힘으로써 알 수 있을 것이다.

화학적 성질

석탄화도의 진행에 따른 석탄의 성질을 알기 위해 가장 좋은 것은 van Krevelen의 H/C-O/C 원자수비 diagram이다. Fig. 4는 diagram 위에 도호탄, 대륙탄 및 국내탄의 분석결과를 삽입한 것이다.

페름기의 호주의 석탄은 이너티나이트군이 많기 때문에 H/C 원자수비가 낮다. 또, 도호탄은 degradinite 또는 엑시나이트군에 의해 H/C 원자수비가 매우 높다. 한편, 국내의 고생대와 중생대의 석탄은 H/C 원자수비, O/C 원자수비 모두가 매우 낮고 van Krevelen의 coal band의 좁은 영역에 집중한다. 이것도 국내의 석탄이 석탄화도가 아주 높다는 것을 의미한다. 이 이유는 국내의 무연탄은 쥐라기 중기에서 백악기 초기에 걸쳐 화강암의 관입이 따른 가장 격렬했던 지각변동인 대보운동에 의해 심

한 석탄화작용을 받았기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 국내의 아역청탄은 동일 석탄화도탄에 비해 H/C 원자수비가 높다. 최근 순수한 degradinite의 화학적 성질은 H/C 원자수비가 약 1.2, O/C 원자수비가 약 0.04로 그 성질은 엑시나이트군(Kerogen type II) 또는 alginite(Kerogen type I)와 비슷하다고 알려져(후지이외, 1985; 박, 1987), 국내 아역청탄의 H/C 원자수비가 높은 것은 degradinite와 유사한 조직의 존재에 의한 영향인 것으로 생각된다.

결론

국내탄에 대한 석탄암석학적 특성과 탄질평가 지표를 조사하고, 외국탄과 석탄암석학적 특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 국내의 고생대, 중생대의 석탄은 변성무연탄에 속한다. 신생대의 석탄은 아역청탄 또는 갈탄에 속한다.

(2) 국내탄의 조직성분조성상의 특징은, 무연탄은 비트리나이트군과 이너티나이트군으로 이루어졌으며, 아역청탄은 대부분이 비트리나이트군이며 일본탄에 포함되어 있는 degradinite와 유사한 조직성분이 많이 포함되어 있다. 이번은 비트리나이트군으로 취급했지만 좀 더 상세한 연구가 필요하리라 본다. 갈탄은 대부분이 휴미나이트군으로 90% 이상을 차지하며 sclerotinite의 종류가 다양하다.

(3) 국내 무연탄에 있어서는, 탄질평가 지표 가운데 석탄화도의 지표로는 비트리나이트 반사율과 탄소함유량이 좋고, 공업적 성질을 표현하는 지표로는 휘발분과 연료비가, 화학적 성질을 표현하는 지표로는 수소함유량과 H/C 원자수비가 좋다.

(4) 국내의 아역청탄 및 갈탄에 있어서는, 석탄화도의 지표로는 비트리나이트 반사율, 스포리나이트형광성 및 탄소함유량이 좋으며, 공업적 성질을 표현하는 지표로는 발열량과 수분, 화학적 성질을 표현하는 지표로는 수소함유량, 산소함유량 및 O/C 원자수비가 좋다.

(5) 국내의 중생대의 석탄은 조직성분 조성상, 고생대의 석탄에 비해 전조기후 또는 지하수위가 낮은 환경에서 생성되었다고 생각된다.

(6) 국내의 제 3기의 석탄은 조직성분조성상, 제 3기의 일본, 필리핀, 인도네시아의 석탄과 유사하며 석탄생성 당시의 환경은 습윤 또는 지하수위가 높은

환경에서 생성되었다고 생각된다.

(7) 국내의 고생대, 중생대의 석탄은 같은 시기의 외국탄에 비해 매우 석탄화도가 높으며, 이것은 유라기 중기에서 백악기 초기에 걸쳐 있었던 대보운동에 의해 심한 석탄화작용을 받았기 때문으로 추정된다.

(8) 국내의 아역청탄은 동일 석탄화도의 외국탄에 비해 발열량, 휘발분, H/C 원자수비가 매우 높는데, 이것은 degradinite와 유사한 조직성분의 영향으로 생각된다.

참고문헌

- 박석환, 박홍수(1988) 석탄물성연구(충남탄전성주지역), 한국동력자원연구소, p.7-84.
- 박석환(1985) 석탄물성연구 I (경주, 영일지역갈탄), 한국동력자원연구소, p.7-62.
- 박홍수(1987) 일본열도 및 한반도에서 산출되는 석탄의 암석학적, 고석물학적 연구, 와세다대학 대학원 박사학위논문. (일문)
- 사사키 미노루(1959) 석탄이용기술회 회의록, p. 37-143. (일문)
- 엄상호외(1962) 경주, 영일지구 갈탄전시추조사보고, 제 3호, 국립지질조사소, p.3-84.
- 이상만(1979) 한반도의 지질과 테크토닉스, 이와나미강좌지구과학, 이와나미서점, p.355-398. (일문)
- 임복순외(1982) 북평지역 제 3기 갈탄층 연구, 한국동력자원연구소.
- 자원개발연구소(1979) 삼척탄전 정밀지질조사 보고서.
- 키무라 히데오외(1976) 석탄화학공업, 삼공출판. (일문)
- 한국동력자원연구소(1984) 석탄자원조사연구, p. 1-91.
- 후이지 케이쥬외(1980) 석탄화도 지표에 관한 몇 가지 문제점, 석유기술협회지, Vol.45, p.345-352. (일문)
- 후이지 케이쥬외(1985) 비트리나이트 반사율과 매물 심도와의 관계에 관한 문제점, 지질조사소월보, Vol.36, p.103-110. (일문)
- 후이지 케이쥬, 박홍수(1985) 한국의 석탄자원, 지질뉴스, No.366, p.58-63. (일문)
- ASTM-D388-82(1982) Standard classification of coals by rank, p.238-242.
- Broadbent, S.R., *et al.*(1955) Reflectance of coal, Fuel, Vol.34, p.385-403.
- Hutton, A.C., *et al.*(1980) Influence of alginite on the reflectance of vitrinite from Joadja, NSW, and some other coals and oil shales containing alginite, Fuel, Vol.59, p.711-744.
- JIS-M8812-4(1976) 석탄류의 시험방법. (일문)
- JIS-M8816(1986) 석탄의 미세조직성분 및 반사율 측정방법. (일문)
- Kim, B.K.(1970) A study on the Neogene Tertiary deposit in Korea, Jour. Geol. Soc. Korea, 6, p. 77-96.
- Krevelen, D.W.van(1961) Coal, Elsevier.
- Marchioni, D.L.(1980) Petrography and depositional environment of the Liddel seam, upper Hunter Vally, New South Wales, Inter. J. Coal Geol., Vol. 1, p.35-61.
- McCartney, J.T., *et al.*(1972) Classification of coals according to degree of coalification by reflectance of the vitrinite componet, Fuel, Vol.51, p.64-68.
- Ottjenhahn, K., *et al.*(1973) Fourth meeting of the international commission on petrography of dispersed organic material in sediments and geologic application, Paris, Sep., 1973.
- Reedman, A.J., *et al.*(1975) The geology of Korea.
- Shibaoka, M., *et al.*(1975) Coal petrology and the formation of coal seams in some Australian sedimentary basins, Econ.Geol., Vol.70, p.1463-1473.
- Stach, E., *et al.*(1982) Textbook of coal petrology, 3rd ed.
- Strauss, P.G., *et al.*(1976) Coal petrography as an exploration aid in the West Circum-Pacific, Coal Exploration, Miller Freeman Pubs. Inc., p.401-447.
- Teichmüller *et al.*(1977) Application of fluorescence microscopy in coal petrology and oil exploration, Journ.Microsc., No.109, p.49-73.
- Thomas, L.P. and Park, S.W.(1976) Investigation of the geology of the coalfield of Korea, Korea Res. Inst. Geosic. Min. Resour.