고려시대 선체출토 석탄의 재료학적 특성 및 국산 석탄과의 비교 연구

이장준¹ | 박석환* | 임성태** | 한민수

국립문화재연구소 보존과학연구실, *한진 D&B, **국립해양문화재연구소

Comparison Study for Domestic Coal and Material Characteristics of Coal from the Shipwreck of Koryo Dynasty

JangJon Lee¹ | SukWhan Park* | SungTae Lim** | MinSu Han

Conservation Science Division, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

*Hanjin D&B, Gwangju, 506-301, Korea

**National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, Mokpo, 530-839, Korea

¹Corresponding Author: jang824@lycos.co.kr, +82-42-860-9424

초 록 태안군 마도 해역 해저에서 인양된 마도 1호선의 선체 내·외부에서 출토된 석탄의 지구화학적 및 광학적, 광물학적 특성을 분석하였다. 연구 결과, 석탄의 비중은 1.28g/cm^3 로 약 10%의 광물질 함유 상태를 고려하면 순수한 석탄만의 비중은 1.15g/cm^3 정도이며, 갈탄과 유연탄 사이의 범위 해당된다. X-선 회절분석 결과는 peak점의 2θ 는 $20^\circ \sim 23^\circ$ 사이로 낮은 탄화정도의 석탄에 해당되었으며, 석탄구성물질 분류에서 비트리나이트 군이 93~94%, 엑시나이트 군이 5~6%, 인어티나이트군이 1% 이었다. 또한 석탄의 비트리나이트 평균반사율은 $R_{\text{mean}}: 0.627$ 로 고휘발분역청탄 C(high volatile bituminous C coal) 또는 아역청탄 A(sub-bituminous A coal)에 해당된다. 공업분석 결과 미국 광무국의 기준에 의하면 아역청탄 A(sub-bituminous A coal) 또는 고휘발분역청탄 C(high volatile bituminous C coal)에 해당되며, 원소 분석 결과 역청탄에 해당되는 점결탄으로 분류된다. 마도1호선 석탄과 국내 석탄을 비교 분석 결과 포항 인근 장기지역의 갈탄과 유사하였다.

중심어: 석탄, 마도 1호선, 마세랄, 공업분석, 아역청탄

ABSTRACT This study analyses geochemical, microscopic, mineralogical characteristics of coals which have been collected from in and out of the shipwreck No 1 of Mado island during underwater excavation in Taean. The result from mineralogical and geochemical analysis reveals that the specific gravity of the coals is 1.28g/cm^3 . Considering that coals contains 10% mineral of it and the specific gravity of the pure is 1.15g/cm^3 , it is believed that the collected coals would be lignite or bituminous coal. The X-ray diffraction analysis which displays the peak of 2θ is $20 \sim 25^\circ$ degree, proves that the collected coals would be categorised as low rank coal. The collected coals is composed of: 93%-94%(93.5%) of vitrinite maceral group, 5%-6%(5.5%) of exinite maceral group, and 1% of inertinite maceral group. In addition, the average of reflection rate is $R_{\text{mean}}: 0.627$ showing that it would be either high volatile bituminous C coal or sub-bituminous C coal. Such result confirms that the coal is sub-bituminous C or high volatile bituminous C coal in accordance with the U.S Bureau of Mine(USBM) classification system. The element analysis reveals that the coal is the coking coal which

is grouped as the bituminous coal. Comparative analysis between the coals of Mado Shipwreck No 1 and domestic coals shows that the coals of Mado Shipwreck is similar to the bituminous coal used in the area of Janggi in Pohang city.

Key Words: Coal, Mado shipwreck No.1, Maceral, Proximate analysis, Sub-bituminous coal

1. 서 론

2008년 5월부터 2010년 6월까지 충남 태안군 근흥면 신진도 마도 해역 1구역(N 36°41'425", E 126°07'264") (Figure 1A)에서 탐사 및 수중 발굴을 실시한 결과로 고려 시대 선박 1척(마도 1호선)이 발견되었다. 마도 1호선 선체 내부 남동쪽을 발굴하는 과정에서 석탄이 다량 확인되었는데 일정하게 한 구역에서만 출토되는 것이 아니라 남동쪽 부분에 전체적으로 흐트러져서 출토되었으며, 크기는 20cm 이상의 것과 수 센티미터의 크기까지 다양하였다 (Figure 1B~1D).

석탄의 가장 원시적인 사용은 가정연료 및 취사용이며 현재에는 여러 분야에서 에너지를 생산하는 원료로 사용

되고 있다. 이러한 석탄이 해저에서 인양된 고려시대 고선 박과 함께 발굴되었다는 것은 그 시대 석탄의 용도와 생산지를 밝히는데 중요한 단서가 된다.

국립해양문화재연구소 「태안마도 1호선 수중발굴조사 보고서」에 따르면, 마도 1호선에서 발굴된 목관과 죽찰 내용에서 1208년 2월 19일까지 날짜가 확인되었다. 화물 발신지로 마도 1호선의 이동경로를 살펴보면 전라도의 수령현(遂寧縣, 장흥군), 죽산현(竹山縣, 해남군), 회진현(會津縣, 나주시 다시면)에서 공물을 싣고 개경으로 향하던 중 1208년 봄 태안 마도 앞바다에서 침몰된 것으로 추정된다 (Korea Energy Economics Institute, 2005).

우리나라에서 석탄에 관한 최초의 기록으로 서기 1590년(선조23년)의 평양관찰사 윤두수가 편찬한 『평양지』

Figure 1. Location map and images of excavated coal from the Mado shipwreck No. 1. (A) Satellite image map from the Daum, (B) Coal in seabed, (C, D) Excavated coal (National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, 2010).

에서 「성동 10리 허의 문수봉에 석탄소가 있고 정도 천마련 및 고방산 등지에 석탄이 있다. 불이 붙어도 연기가 나지 않으므로 무연탄이라 한다.」라는 기록을 찾아 볼 수 있다(National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, 2010). 마도 1호선에 인양한 석탄은 이보다 약 380년 전의 것으로 고려시대 지배층의 문헌자료로 알 수 없었던 생활용품 연구에 중요한 의미를 가지는 자료라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 마도 1호선 선체 내부와 외곽에서 출토된 석탄의 재질 특성을 검토하기 위해 광물학적 및 지구화학적 연구를 수행하였으며, 마세랄(maceral)의 종류와 특징 등을 분석하기 위해서 기재학적 연구를 실시하였다. 이러한 연구를 토대로 국내 석탄의 특성과 비교하여 마도 1호선 석탄의 산지도 함께 추정하고자 하였다.

2. 연구방법

태안 마도 1호선에 출토된 석탄은 오랫동안 바닷물과 갯벌에 노출되어 있었으므로, 40℃의 1차 증류수에 완전히 침수시킨 후 24시간 간격으로 일주일동안 증류수를 교체하여 탈염처리를 실시하였다. 탈염이 끝난 석탄은 흡습포를 이용하여 표면에 있는 수분을 제거하고 30일 동안 자연 건조시켰다.

석탄의 겉보기비중은 분석용 저울(GX-600)과 비중측정기(GX-13)를 이용하였다. 측정방법은 KS L 4008에서 규정하는 방법을 이용하였으나, 측정시편이 유물이라는 제약 때문에 규정에서 요구하는 50g 이상의 시편은 이용하지 못했으며, 30g 이상의 시료에 대해 3회 측정하여 평균값을 제시하였다.

석탄 구성물질의 현미경 분석은 박편(thin section)을 만들어 투과현미경하에서 관찰하여 마세랄의 색(황, 적갈, 흑 등)과 형태(식물의 조직구조) 등으로 마세랄의 종류를 구분하는 것과, 석탄의 연마편을 만들어 반사현미경하에서 마세랄의 밝기(흑, 백 정도)와 형태(식물의 조직구조)등으로 마세랄의 종류를 구분하는 것이다(Francis, 1978; Park *et al.*, 1993). 일반적으로 이들 두 방법 중에서 후자를 이용하는 경우가 많은데 전자는 석탄이 빛의 흡수력이 강하여 측정용 박편의 두께가 10~12 μ m 정도로 얇아야 되므로 박편제조상에 어려움이 있는데 반하여 후자는 구성 물질 분류를 하면서 동시에 탄화정도도 측정할 수 있기 때문에 본 시험에서는 후자의 방법을 사용하였다(Park *et al.*, 1993).

반사율 측정은 한국지질자원연구원에서 실시하였으며 반사율 측정에 사용된 표준물질은 유리로써 546nm 파장의

단색광에서 굴절율은 $R_{oil}:0.299$, $R_{oil}:0.506$ 와 $R_{oil}:0.940$, $R_{oil}:1.025$, $R_{oil}:1.381$, 그리고 $R_{oil}:1.672$ 이다. 비트리나이트 반사율(reflectance)은 측정치의 편차가 적은 유침(immersion oil)식 대물렌즈를 사용하여 측정하고 평균반사율(R_{mean})을 계산하였다. 연마편 시료에 대해 100개 지점의 비트리나이트 반사율을 측정하였으며, 이 때 측정시야 내의 비트리나이트는 흠집이 없고 광물입자를 함유하지 않는 곳을 선택하였다. 또한 측정 장치의 안정성을 유지하기 위해 측정 작업 시 30분마다 표준시료의 반사율을 측정하였다(Davis, 1978).

연마편은 석탄을 18~200 메쉬 사이의 입도로 분쇄한 후 automatic mounting press(모델 Simplot2000, Buehler, Lake Bluff, 미국)를 사용, thermal plastic mount로 제작하였다. Automatic point counter(Swift社, England)가 부착된 반사현미경(orthoplan microscope with MPV 2 microphotometer, Ernst Leitz社, 서독)을 이용하여 석탄의 유기물 조직인 마세랄(maceral)을 관찰하였다(Lee *et al.*, 2010).

석탄에 함유된 광물의 조성과 상대적 함량을 동정하기 위해 X-선 회절분석(X-Ray Diffractometer, PANalytical, X'Pert PRO MPD, X'Pert HighScore Plus 소프트웨어, Cu Target, 40kV, 30mA, scanning speed 0.003°/s)을 5°~70°까지 실시하였다.

석탄의 공업분석은 대한석탄공사기술연구소에서 분석하였으며, 수분, 휘발분, 회분은 하나의 분석과정(ASTM D5142)을 거쳐 순차적으로 분석하였다. 원소분석은 C, H, N은 ASTM D5373, S는 ASTM D4239에 의해 측정하고, O는 100에서 C, H, N, S 및 회분함량을 뺀 값으로 계산하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 물리적 특성 분석

마도 1호선 석탄의 비중을 측정하여 석탄의 종류에 따른 비중을 비교 분석하였다. 일반적으로 석탄에 함유되는 광물의 비중은 2g/cm³~3g/cm³으로 취급되며, 석탄의 비중은 1.1g/cm³~1.8g/cm³까지 변하고 석탄을 형성한 주위의 암석보다 낮은 비중을 가지고 있다(Telford *et al.*, 1990).

마도 1호선 석탄시료의 겉보기비중은 1.28g/cm³로 공업분석 결과에서 10%(ash: 10.15%)의 광물질 함유를 고려하면 순수한 석탄의 비중은 1.15g/cm³ 정도이다. 이는 갈탄(Lignite)과 유연탄(Bituminous coal) 사이에 해당된다

Table 1. Specific gravity of coals and associated sedimentary and igneous rocks (Telford *et al.*, 1990).

Lithology	Specific gravity g/cm ³		Mado coal
	Range	Average	
Sandstone	1.62 - 2.76	2.35	
Shale	1.77 - 3.20	2.40	
Limestone	1.93 - 2.90	2.55	
Lignite	1.10 - 1.25	1.19	1.15
Bituminous coal	1.20 - 1.80	1.32	
Anthracite	1.34 - 1.80	1.50	
Acidic Igneous rock	2.30 - 3.11	2.61	
Basic Igneous rock	2.09 - 3.17	2.79	
Metamorphic rock	2.40 - 3.10	2.74	

(Table 1).

3.2. X-선 회절분석

X-선 회절에 의한 석탄의 결정형태 확인은 주로 탄화가 많이 진행되어 탄소의 층상구조가 층서상으로 질서정연하게 배열되어 있을 때 효과적으로 사용될 수 있다. 그러므로 흑연, 변성무연탄, 무연탄, 저휘발분 역청탄의 경우에 많이 사용한다. 갈탄이나 아역청탄 같이 탄화정도가 낮은 석탄에서는 탄소 층상구조가 제대로 형성되지 않았으며 배열도 무질서하여 2θ 값 24° ~ 25° 사이에서 peak의 배경강도만 보여주게 된다(Teichmüller, 1968).

마도 1호선 석탄의 X-선회절분석 결과 배경강도의 중심에 해당하는 2θ는 20° ~ 23° 사이로 낮은 탄화정도의 석탄(low rank coal)에 해당되었다. Figure 2에서 석탄의 광물질 함유(ash: 10.15%) 때문에 석탄특성 보다는 광물들의 회절선이 강하게 나타나고 있으며, 석탄시료에 함유된 대표적인 광물은 제올라이트(zeolite), 황철석, 석영, 방해석 등임을 알 수 있다.

3.3. 광학적 특성

석탄의 대부분은 유기물로 구성되어 있으며(>50% 무게, >70% 부피) 이들 유기물이 현미경 하에서 구별되는 기본 단위를 마세랄(maceral)이라고 한다. 석탄은 3개의 마세랄 군(maceral group)과 10개 이상의 마세랄로 구성되며 각 마세랄은 반사율, 형태와 구조, 색조(色調), 이방성(異方性), 내부반사(内部反射), 형광(螢光), 연마강도 등에 의해

Table 2. Maceral composition and mineral content in Mado shipwreck No.1 examined under an immersion medium.

Maceral group	Maceral	Component ratio (%)	
		First	Second
vitrinite	telinite	10	9
	detrinite	-	-
	collinite	83	85
	Total	93	94
exinite	resinite	5	4
	sporinite	0.5	-
	cutinite	0.5	1
	alginite	-	-
	suberinite	-	-
	Total	6	5
inertinite	fusinite	-	-
	semifusinite	-	-
	sclerotinite	1	1
	inertodetrinite	-	-
	Total	1	1

Figure 2. X-ray diffraction pattern for coal of the Mado shipwreck No.1.

서 구별된다(McCabe, 1984).

마도1호선 석탄에 대한 석탄구성물질 분류는 비트리나이트 군(vitrinite maceral group)이 93%-94%(93.5%), 엑시나이트 군(exinite maceral group)이 5%-6%(5.5%), 인어티나이트군(inertinite maceral group)이 1% 이었다(Table 2).

현미경하에서 비트리나이트의 경우는 콜리나이트(collinite)가 대부분이며 엑시나이트(exinite)는 레지나이트(resinite)가 대부분인 것으로 관찰되었다. 또한 인어티나이트(inertinite)에서는 스크레로티나이트(sclerotinite)가 소량 분포되며 푸지나이트(fusinite)나 세미푸지나이트

(semifusinite)는 거의 존재하지 않았다. 이와 같은 구성물질의 분포현상은 매우 특이한 현상으로서 식물의 목질부, 껍질, 잎 등이 산소공급이 풍부하지 못한 환경하에서 형성된 비트리나이트(korea institute of energy research, 1991)가 대부분 관찰되는 것으로 보아 이들 석탄층은 근원식물이 비교적 수면이 높은 환경에서 퇴적되었을 것으로 추정된다. 또한 산소 공급이 매우 풍부한 환경하에서 형성된 인어티나이트(korea institute of energy research, 1991)가 소량 분포된 것으로 보아 인어티나이트 마세랄 생성을 위한 산화 환경 조성이 거의 생략되었고, 우세한 환원환경이 유지된 것으로 유추된다. 그러므로 석탄 내에 황철석(Pyrite)이 큰 결정 형태로 존재하여 함유량이 높으며 이로 인해 유황성분(S)의 함유량도 2%로 비교적 높게 측정되었다(Figure 3D).

현미경하에서의 마세랄의 특징은 Figure 3에서와 같이

비트리나이트는 콜리나이트와 텔리나이트(telinite)로서 콜리나이트(collinite)가 양적으로 우세하고, 부분적으로 cell구조를 레지나이트 물질이 채우고 있으며, Figure 3A과 Figure 3B은 비트리나이트 내에 레지나이트, 스포리나이트(sporinite)등이 다량 함유된 것을 보여주고 있다. 또한 Figure 3C에서 비트리나이트 세포구조를 엑지나이트 물질이 채우고 있어 어두운 색조를 보여주고 있다.

3.4. 석탄의 탄화정도

석탄 구성물질 중의 하나인 비트리나이트의 반사율이 탄화의 진행에 따라 증가하는 성질(Hoffman and Jenkner, 1932; Lee *et. al.*, 2010)을 이용하여 탄화정도를 측정할 수 있다. 마도1호선 석탄시료에 대한 비트리나이트 반사율은

Figure 3. The result of classification for the component of coal through observation by reflecting microscope. (A) Significant gelification of vitrinite has been progressed, (B) Exinite maceral group is contained with vitrinite, (C) Mixture of maceral of exinite group and materials infilling vitrinite cell lumens appears dark shade, (D) Widely distributed pyrite of large crystals is separated from vitrinite.

석탄의 특성인 불균질성을 고려하여 3개의 시료를 채취하여 측정하였다.

반사율 측정결과 평균 반사율이 0.63로 고휘발분역청탄 C (high volatile bituminous C coal) 또는 아역청탄 A(subbituminous A coal)에 해당된다(Figure 4, Table 3). 또한 현미경하에서 관찰되는 비트리나이트는 대부분 겔화상태(gelification)가 발달되어 매우 균질한 상태를 보여주며 때로는 세포구조가 겔화된 물질로 채워지기도 한다(Figure 3). 여기에서 세포구조를 채운 물질은 엑시나이트 군에 속하는 마세랄로서 어두운 색조를 띠고 있다. 실제로 원소분석 결과에서 수소의 성분이 건조회분제거 기준(daf)에서 6.58로 높게 나타나고 있는 것은 이들 엑시나이트 군의 마세랄들이 많이 포함되어 있기 때문이다. 이들 엑시나이트 군은 비트리나이트에 오염형태로 섞이게 어 비트리나이트 반사율의 감소 비율을 약간 저감시키게 된다.

3.5. 공업분석

공업분석은 석탄이 가열될 때 갖게 되는 여러 가지 성질을

알아보는 분석으로서 주로 석탄의 휘발분(Volatile Matter), 고정탄소(Fixed Carbon), 회분(Ash), 수분(H_2O), 유황(S) 그리고 발열량(Calorific Value)등을 측정한다.

공업분석 결과 석탄의 탄화정도는 미국광무국(United States Bureau of Mines)의 기준에 의하면 고휘발분역청탄 C(high volatile bituminous C coal)에 해당된다(Table 4, 5). 여기에서 발열량의 경우 석탄이 지하탄층 상태에서 가지고 있는 수분(Bed moisture content, 이는 총 수분과 유사를 포함한 상태에서 광물질을 제거한 발열량을 의미하는데, 마도 1호선 석탄시료의 총 수분을 분석하기 위해서 시료가 1kg 이상 필요하며 오랜 기간 해저에 수몰되어 있어서 총 수분(total moisture)의 측정이 불가능 하였다. 따라서 습윤, 광물질 제거 기준의 발열량(C.V.: moist, mineral matter free, mmf)을 계산하기 어려웠다. 다만 이론적으로 탄화정도에 따른 수분의 함유상태는 Figure 5와 같이 변화고 있어(Berkowitz, 1979) 탄소함유량을 약 80% 일 때 총 수분을 15%로 가정하여 무수기준(dry basis)의 발열량을 참고로 하고 발열량(C.V.: moist, mineral matter free, mmf) 값을 7054kcal/kg로 계산하였다.

Table 3. Vitrinite Reflectance for coal of the Mado shipwreck No.1.

Sample	Mean	SD	MIN	MAX
Coal-A	0.63	0.03	0.55	0.70
Coal-B	0.61	0.02	0.55	0.66
Coal-C	0.64	0.02	0.60	0.70

※ SD: Standard Deviation

3.6. 원소분석

원소분석(ultimate analysis)은 석탄의 주요 구성원소인 탄소(C), 수소(H), 산소(O)와 질소(N) 그리고 유황(S) 등에 대한 분석이다. 탄소는 석탄의 주성분이며 순수한 석탄에 대한 탄소 함량은 갈탄(lignite)이 60~70%, 역청탄(bituminous coal)이 70~85%, 무연탄(anthracite)이 85~

Figure 4. Vitrinite Reflectance histograms for coal of the Mado shipwreck No.1 coal(Mean reflectance (V-type) is ten times of vitrinite reflectance).

Table 4. Proximate analysis result for coal of the Mado shipwreck No.1 coal.

M.O.(ad) (%)	Ash(ad) (%)	V.M.(ad) (%)	F.C.(ad) (%)	S.t.(ad) (%)	S.c(dry) (%)	M.M (%)
Proximate analysis result						
1.57	10.15	41.63	46.81	1.93	1.42	11.85
V.M.(d.m.f) (%)	V.M.(daf) (%)	F.C.(d.mf) (%)	C.V.(ad) (Kcal/Kg)	C.V.(dry) (Kcal/Kg)	C.V.(daf) (Kcal/Kg)	C.V.(mmf) (Kcal/Kg)
Analytic data after standardized conversion for Proximate analysis						
48.08	47.07	54.07	7200	7315	8141	7054

※ ad: Air Dry Basis(measurement after remove 100% of the water). daf: Dry ash free basis(remove the contents ash and sulphur in coal sample). d.m.f: Dry mineral matter(excepte the dried minerals) M.O.: moisture, V.M.: volatile matter, F.C.: fixed carbon, St: total sulphur, Sc: combustible sulphur, M.M.: mineral matter, C.V.: calorific value, m.m.f: dry mineral matter free

Table 5. Degree of coalification accordingly classified standard in United States Bureau of Mines(ASTM D388-84).

Class	Group	F.C.(%) (d.m.f)		V.M.(%) (d.m.f)		Cal (m.m.f)	
		Range	Mado	Range	Mado	Range	Mado
Anthracite	1. Meta-Anthracite	>98		<2			
	2. Anthracite	92-98		2-8			
	3. Semi-anthracite	86-92		8-14			
Bituminous coal	1. Low-volatile	78-86		14-22		>7,840	
	2. Medium-volatile	69-78		22-31		7,280-7,840	
	3. High-volatile A	<69		>31		6,440-7,280	
	4. High volatile B						7054
	5. High volatile C						
Subbituminous coal	1. Subbituminous A		54.07		48.08	5,880-6,440	
	2. Subbituminous B					5,320-5,880	
	3. Subbituminous C					4,648-5,320	
Lignite	1. Lignite A					3,528-4,648	
	2. Lignite B					<3,528

Figure 5. Generalized variation of bed moisture contents with coal rank(to assume embodied carbon 80%) (Berkowitz, 1979).

95%의 범위에 있다. 또한 수소 함량은 갈탄이 5~7%, 역

청탄이 4~6%, 무연탄이 2~4%의 범위로서 이들은 탄화가 진행됨에 따라 탄소함량은 증가하고 수소함량은 감소되는 경향을 보여 준다(Richard, 1981; Park *et al.*, 1993).

원소분석에서의 분석기준은 무수기준(dry basis)인데 연소법에 의해서 얻어진 석탄의 탄소(C) 함유량에는 석회질광물(carbonate minerals)중의 탄소(C)도 포함하고 있으며 수소(H) 함유량에도 함유광물(hydrate minerals) 중의 수소와 시료의 수분중의 수소도 포함되기 때문이다.

원소분석 결과 석탄은 탄소(C)함유량 83.12%로 석탄분류에서 역청탄에 해당되는 점결탄으로 분류되는데 이는 분석과정에서 석회질광물이 탄소량에 영향을 미쳐 보다 높게 측정 된 것으로 해석된다. 마도 1호선 석탄의 품질에서는 유황성분이 약 2%가 문제가 될 수 있지만 직접연소 형태의 연료용으로는 매우 좋은 석탄이며 수소의 성분이

Table 6. Ultimate analysis result for coal of the Mado shipwreck No.1 coal.

	C(%)	H(%)	N(%)	O(%)	S(%)	Ash	Total
Contents of ultimate analysis(dry)	74.68	5.91	0.97	6.33	1.96	10.15	100
Analytic data after conversion for ultimate analysis(dry ash free)	83.12	6.58	1.08	7.05	2.18	-	100

Table 7. Comparison of outcome by proximate and ultimate analysis between the local coal and the coal of Mado shipwreck No. 1 (Park, 2004).

Area	Gyeongju	Dogu	Janggi	Yeongdeok	Pukpyung	Mado
Comparison of proximate analysis						
V.R(R_{mean})	0.38	0.41	0.60	0.32	0.31	0.63
F.C.(daf)	43.35	28.75	50.48	45.90	43.30	52.93
V.M.(daf)	56.65	71.25	49.52	54.1	56.70	47.07
C.V.(daf)	6813	6877	7509	6191	6081	8141
F.C.(dmmf)	45.63	32.74	53.31	48.16	60.76	54.07
V.M.(dmmf)	59.64	81.13	52.29	56.77	79.55	48.08
Coal Rank	Lignite A	sub-bituminous C	sub-bituminous A(high volatile bit.C)	Lignite B	Lignite B	sub-bituminous A(high volatile bit.C)
Comparison of ultimate analysis						
C(daf)	69.11	62.16	73.44	67.21	64.45	83.12
H(daf)	5.18	6.44	5.68	3.48	4.42	6.58
N(daf)	1.63	1.22	1.02	1.51	0.63	1.08
O(daf)	23.75	29.07	19.12	25.36	26.93	7.05
S(daf)	0.34	1.12	0.76	2.44	3.57	2.18
Coal Rank	Lignite	Lignite	sub-bituminous ~ bituminous	Lignite	Lignite	sub-bituminous ~ bituminous

※ V.R: vitrinite reflectance R_{mean} : mean reflectance. daf: dry ash free dmmf: dry mineral matter free

높아 발열량이 높고 연소에서 매우 활성으로 액화 원료탄으로 사용 가능성이 예측된다(Table 6).

3.7. 국내석탄과 마도1호선 석탄의 특성비교

국내의 석탄자원은 대부분 무연탄이고 그 이외에 아주 소량의 갈탄과 아역청탄이 분포하고 있으며, 13개의 무연탄 탄전과 5개의 무연탄 지구 그리고 1개의 갈탄 탄전과 갈탄지구가 분포한다(Park, 2004)(Figure 6B). 마도 1호선 석탄의 재료학적 특성 연구를 통한 갈탄과 역청탄의 경계부에 해당되는 에 해당되는 석탄으로 밝혀졌고, 이를 결과를 토대로 한국지질자원연구원의 「중생대 함탄층과 석탄의 암석지화학적 특성. IN 한반도/동북아 중생대 지각진화

연구」 연구결과 중에서 국내 1개의 갈탄 탄전과 갈탄지구의 석탄에 대해 특성비교를 실시하였다.

우리나라 갈탄지구의 석탄 중에서 마도 아역청탄 A(고휘발분 역청탄 C)은 포항시 장기지역의 아역청탄과 가장 유사한 석탄임을 알 수 있었다. 비교분석 결과 비트리나이트 반사율과 고정탄소, 발열량은 장기지역 석탄이 다소 낮은 값을 보였으며, 휘발분은 장기지역 석탄이 다소 높은 값을 보였다(Table 7, Figure 6). 또한 원소분석에서 산소를 제외한 탄소, 수소, 질소, 황은 장기지역 석탄이 다소 낮은 값을 나타냈다(Table 7, Figure 6). 일반적으로, 석탄의 탄화정도 분류(rank classification)에서 아역청탄 A와 고휘발분역청탄 C는 동일 탄화정도를 갖는 것으로 취급된다(ASTM rank classification, 1983).

Figure 6. (A) Comparison of characteristics between the local coal and the coal of Mado shipwreck No. 1 (Values of the C.V.(daf)/100), (B) Characteristics of coal in South Korea (Park, W.H., 2004).

4. 결 론

충남 태안 마도지역 해저에서 인양된 마도 1호선 석탄의 재질 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 태안 마도 1호선 석탄의 비중은 1.28g/cm^3 로 약 10%의 광물질 함유를 고려하면 순수한 석탄의 비중은 1.15g/cm^3 정도이며, 갈탄과 유연탄 사이에 해당되었다.
2. X-선회절분석 결과, peak점의 2θ 값이 $20^\circ \sim 23^\circ$ 사이로 낮은 탄화정도의 석탄(low rank coal)에 해당되었으며, 석탄시료에 함유된 대표적인 광물은 제올라이트, 황철석, 석영, 방해석 등임을 알 수 있었다.
3. 석탄구성물질 분류(조직분석)에서 비트리나이트 군(vitrinite maceral group)이 93~94%(93.5%), 엑시나이트 군(exinite maceral group)이 5~6%(5.5%), 이너티나이트 군(inertinite maceral group)이 1%로서 높은 반응성이 기대되며 석탄의 액화 원료탄으로 가능성이 높다.
4. 반사율 측정결과 평균반사율이 0.63%로 고휘발분역

청탄 C(high volatile bituminous C coal) 또는 아역청탄 A(subbituminous A coal)에 해당된다.

5. 석탄의 탄화정도는 탄소(C)에 의한 석탄분류에서 역청탄에 해당되는 점결탄으로 분류되는데 이는 분석과정에서 석회질광물이 탄소량에 영향을 미쳐 보다 높게 측정된 것으로 해석되며, 미국 광무국의 기준에 의하면 아역청탄 C(sub-bituminous C coal) 또는 고휘발분역청탄 C(high volatile bituminous C coal)에 해당되었다.

6. 마도 1호선 석탄의 품질에서는 유황성분이 약 2%가 문제가 될 수 있지만 직접연소형태의 연료용으로는 매우 좋은 석탄이며 수소의 성분이 높아 발열량이 높고 연소에서 매우 활성으로 액화 원료탄으로 사용 가능성이 예측된다.

7. 마도 1호선 석탄의 탄화정도는 국내의 갈탄류와 유사하며 특히 포항 인근의 장기지역에 분포되는 석탄과 유사하다. 그러므로 해저유물 석탄을 국내의 석탄 중에서 그 출처를 찾는다면 장기지역의(경북 포항시 장기면) 석탄이 이에 해당될 수 있을 것이다.

REFERENCES

- ASTM Rank Classification, 1983, Stach's textbook of coal petrology. Berlin: Gebruder Borntraeger, 3rd ed., 45.
- Berkowitz, N., 1979, An introduction to coal technology. Academic Press, New York, 1-398.
- Davis, A., 1978, The reflectance of coal. In Analytical Methods for coal and coal products(ed. Karr, C.), Academic press, New York, 1, 27-81.
- Francis, T.C.T., 1978, Analytical Methods for Coal and Coal Products. Academic Press, New York, 1, 4-6.
- Hoffmann, E. and Jenkner, A., 1932, Die Inkholung und ihre erkenntnis im Mikrobild. Gluckauf 68, 81-88.
- Korea Energy Economics Institute, 2005, The History of Coal Industry in Jeongseon County from 1948 to 2004. Jeongseon County, 543. (in Korean)
- Korea Institute of Energy Research, 1991, Development of the sample bank and the data base for the domestic and foreign anthracite coals. Korea Institute of Energy Research, 156. (in Korean)
- Lee, S.J., Park, W.H., Bae, I.K., Kwon, S.W. and Shin, H.Y., 2010, Characterization of Mongolian Baganuur Coal Properties. Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering, 47, 668-667. (in Korean with English abstract)
- McCabe, P.J., 1984, Depositional environments of coal and coal-bearing strata. In Sedimentology of Coal and Coal-Bearing Sequences (eds Rahmani, R.A. and Flores, R.M.), Blackwell scientific publications, Oxford, UK, 13-42.
- National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, 2010, Taean Mado Shipwreck No.1 underwater excavation. Cultural Heritage Administration, 652. (in Korean)
- Park, C.W., Park, S.W., Hyun, J.S. and Shon, E.K. 1993, A Study on the Optical Characteristics of Anthracite Coals. Journal of the Korea Institute of Chemical Engineers, 6, 852-857. (in Korean with English Abstract)
- Park, W.H., 2004, Mesozoic Coal-bearing Formations and Coal Geochemistry. In Mesozoic crustal evolution of Northeast Asia. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 557. (in Korean)
- Richard, C.N. 1981, Chemistry of Coal Utilization. John Wiley & Sons, Inc, 133-135.
- Teichmuller, M.R., 1968, Geological aspects of coal metamorphism. In coal and coal-bearing strata. 233-267.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., and Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics(2nd ed.), Cambridge University Press. Cambridge, 1-792.
-