

옥천변성대의 덕평 및 추부지역 변성퇴적암에 함유된 유기물의 열적 성숙도 및 지화학적 특성

오재호¹ · 김정미^{2,*} · 김용미¹

¹한국지질자원연구원

²충남대학교

요 약

옥천변성대의 덕평지역 및 추부지역의 변성퇴적암에 함유되어 있는 유기물의 열적 성숙도와 지화학적 특성을 파악하기 위하여 광학현미경(OM), 원소분석(C, H, O), X-선 회절(XRD)분석, 주사전자현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM) 그리고 라만 마이크로스펙트로메트리(Raman microspectrometry)에 의한 분석을 수행하였다. 분석된 덕평지역 시료의 총 유기탄소 함량은 11.1 ~ 46.9%이며, 추부지역은 2.1 ~ 44.5%로 전체적으로 덕평지역이 높다. 원소분석 결과에 따르면 대부분의 시료에서 99% 이상의 매우 높은 탄소 함량을 나타낸다. XRD 분석결과, 모든 시료들의 d_{002} 저면 간격인 최대피크 점의 값은 3.358~3.361 Å이며 흑연화정도 P (Probability of graphitization) 값은 0.7 이상을 나타낸다. 광학현미경, 주사전자현미경 및 투과전자현미경분석결과에서 나타나는 덕평지역과 추부지역의 변성퇴적암에 함유되어 있는 유기탄소의 형태학적 구조는 동심원, 원형의 다각형 구조가 대부분이며 육각 디스크 형태의 엽상 구조도 관찰된다. 라만 마이크로스펙트로메트리 분석에서도 결합 밴드인 $1,350\text{ cm}^{-1}$ 이 감소하고 흑연의 E2g 띠($1,580\text{ cm}^{-1}$)가 얇고 강하게 나타난다. 따라서 덕평지역과 추부지역에서 채취된 모든 시료에 함유된 유기탄소는 여러 분석 결과 흑연화가 되어 있음을 알 수 있다. 또한 문경지역의 평안누층군과 대동누층군의 퇴적암에 함유되어 있는 고등식물 기원의 유기물과는 형태적 구조와 진화경로가 매우 판이하며, 조류기원(algae) 유기물의 진화형태와 매우 흡사하다.

주요어: 옥천변성대, 유기탄소, 흑연, 투과전자현미경, 라만 마이크로스펙트로메트리, 고등식물, 조류, 다각형 작용

Jae-Ho Oh, Jung Mi Kim and Yong Mi Kim, 2014, Thermal maturation and geochemical characteristics of organic matter from meta-sedimentary rocks of Deogpyeong and Chubu areas in Ogcheon metamorphic belt, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 50, no. 6, p. 707-722

ABSTRACT: The purpose of this research was to investigate thermal maturation and geochemical characteristics of the organic matter of the samples collected from Deogpyeong and Chubu areas in Ogcheon metamorphic belt. Optical microscopy (OM), elemental analysis (C, H, O), X-ray diffraction (XRD), scanning electronic microscopy (SEM), transmission electron microscopy (TEM) and Raman microspectrometry have been used to characterize thermal maturation and geochemical characteristics of the samples. Total organic carbon (TOC) of the Ogcheon metamorphic belt ranges from 11.1 to 46.9% in the Deogpyeong samples and from 2.1 to 44.5% in the Chubu samples. Elemental analyses show that most of the samples were very high in carbon contents (at least 99%). Complete symmetrical reflections were found in all samples in which d_{002} was 3.358~3.361 Å and P was higher than 0.7. OM, SEM and TEM analyses show that the organic matters in Deogpyeong and Chubu areas in Ogcheon metamorphic belt are mostly concentric spherule and hexagonal disc forms. Raman microspectroscopy analysis of the samples indicate two high spectral bands: (1) a very high amplitude and narrow band at $1,580\text{ cm}^{-1}$ (graphite, E2g band) and (2) a moderate amplitude and wide band at $1,350\text{ cm}^{-1}$ (defect band). The analyses of all samples show that they were strongly graphitized. These results suggest that the organic carbon materials of the Ogcheon metamorphic belt were different from the higher plant which was originated from organic carbon found in Moongyeong area. The organic carbon material of the Ogcheon metamorphic belt was the algae originated organic matter.

Key words: Ogcheon metamorphic belt, organic carbon, graphite, transmission electron microscopy, Raman microspectroscopy, higher plant, algae, polygonization

* Corresponding author: +82-42-821-5292, E-mail: jmkim@gmail.com

(Jae-Ho Oh and Yong Mi Kim, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Republic of Korea; Jung Mi Kim, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Republic of Korea)

1. 서론

퇴적암에 함유되어 있는 유기물은 일반적으로 박테리아, 조류, 동물 및 식물 등 다양한 기원으로부터 유래되며 지질시대동안 여러 가지 지질학적 조건에 따라 다양한 진화 경로를 거쳐 변화를 보인다. 유기물의 열적 진화, 즉 변성작용은 유기물이 열, 압력 및 이들이 작용하는 시간에 의하여 물리화학적 영향을 받아 유기물의 특성이 변화하며, 이러한 변화를 유기물의 변성 작용 또는 진화작용이라고 부른다(Durand and Espitalie, 1973). 한반도에는 제3기 포항 퇴적분지를 비롯한 지질시대를 달리하는 여러 개의 퇴적분지가 분포되어 있다. 이들 퇴적분지에 발달되는 퇴적암내 유기물의 특성에 대한 물리화학적 연구는 제3기 포항분지와 대륙붕의 제3기분지 및 백악기 경상분지를 제외하고는 전무한 실정이다. 그러나 문경지역의 평안누층군과 대동누층군의 유기물의 특성 및 진화과정은 연구된 바 있다(Deurbergue *et al.*, 1987; Oh, 1987; Oh *et al.*, 1991). 옥천변성대에 대한 연구는 지질시대 규명에 관련된 층서, 지질구조 및 변성작용과 우라늄에 연관된 광물과 광화작용에 대한 연구는 매우 다양하게 이루어 졌으며(Lee and Kim, 1985; Lee, 1986; Lee and Lee, 1997; Jeong and Lee, 2001; Jeong, 2006), 유기물과 우라늄과 관련된 지화학적 연구(Oh, 1986; Oh *et al.*, 1990; Shin and Kim, 2011)와 광역 열변성 작용에 의한 유기물의 변성정도 연구(Oh *et al.*, 2004)도 수행되어 졌다. 그러나 옥천변성대 변성퇴적암에 함유되어 있는 유기물에 대한 기원이나 이들의 진화과정에 대한 연구는 전혀 이루어지지 않았다. 옥천변성대에 함유되어 있는 유기물에 대한 명확한 지질학적 정의가 없기 때문에 무연탄, 준흑연, 흑연 등 분석에 의한 정확한 용어보다는 야외조사 시 관찰학적인 용어를 많이 사용하였다. 따라서 이 연구의 목적은 옥천 변성대의 퇴적암중 대표적으로 유기물을 가장 많이 함유하고 있는 덕평지역의 문주리층과 추부지역의 창리층의 유기물에 대한 기원, 진화정도 및 물리화학적 특성 등을 다각적인 분석 방법을 통하여 밝히는 것이다. 또한 이미 알려진 문경탄전지역에 분포하는 고생대 및 중생대의

유기탄소(석탄)의 형태, 진화정도 및 흑연화과정 등과 비교 검토하였다. 이를 위하여 원소분석 및 XRD 분석과 같은 전암 분석과 입자 분석인 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM), 투과전자현미경(TEM) 그리고 Raman 마이크로스펙트로메트리에 의한 분석 등과 교차 검증하여 해석하였다.

2. 지질개요 및 시료

2.1 지질개요

연구지역인 덕평지역과 추부지역은 옥천변성대 중부와 중북부에 해당되며, 행정구역상 덕평지역은 충청북도 괴산군 청천면 덕평리 일대에 위치하고, 추부지역은 대전광역시 동구 하소동과 충청남도 금산군 추부면 마전리 일대이다. 덕평 및 추부지역의 지질은 다음과 같다(그림 1, 2).

덕평지역의 지질은 다수의 학자들에 의해 연구가 수행되었다(Lee and Kim, 1972; Lee *et al.*, 1981; Koh, 1995 등). 연구지역에 대한 지질과 층서(Koh, 1995)는 하부로부터 대향산층, 운교리층, 문주리층 및 황강리층으로 구성되는 변성퇴적암층과 이를 후기에 관입한 백악기 불국사 화강암류로 구성되어 있다(그림 1). 대향산층은 주로 우백색 규암으로 구성되어 있으며, 석영운모편암, 석회질변성사암 및 함력 규질편암을 협재하고 있다. 층리를 이루는 중광물의 띠는 주로 저어콘, 전기석 기타 불투명 광물로 구성

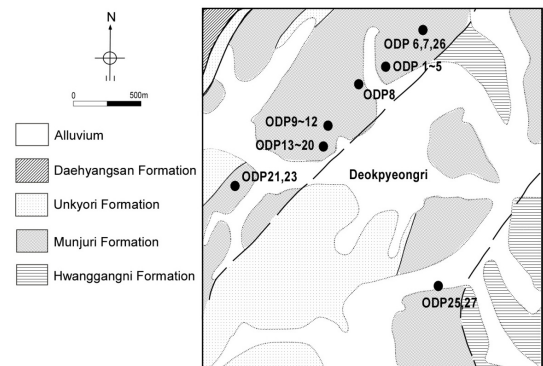


Fig. 1. Geological map of the Deogpyeong area (Koh, 1995) and the locations of sampling sites.

되어 있으며, 역암의 경우 대부분의 역이 우백색 규암이며 석영편암이나 변성 석회질사암 등도 함유되어 있다. 운교리층은 주로 사질천매암과 박층의 결정질석회암 및 변성편암으로 구성되어 있다. 사질천매암은 석영, 백운모, 녹니석, 흑운모와 불투명 광물이 주 구성 광물이며 소량의 석류석, 각섬석 및 자철석이 산출되기도 한다. 문주리층은 본 연구지역의 중앙부에 넓게 분포하며 흑색 내지 회록색 점판암 또는 천매암질 점판암, 사질점판암 및 박층의 결정질 석회암으로 구성되어 있다. 흑색 점판암층 내에는 흑연질 점판암 내지 흑연층이 수매 협재하고 있다. 점판암 또는 천매암은 주로 석영, 백운모, 흑운모, 불투명광물과 흑연질 유기물로 구성되어 있다. 황강리층은 조사지역 동쪽에 분포하며 주로 함역질 이암으로 천매암으로 변성되어 있다. 역은 규암, 셰일, 석회암이 주이고 화강암, 사암, 변성암도 함유하고 있다. 기질부는 석영, 백운모, 흑운모, 녹니석, 방해석, 각섬석 및 견운모가 주 구성광물이며 흑연질 부분에는 각섬석과 방해석이 나타난다(Lee *et al.*, 1981).

추부지역의 지질은 옥천 누층군의 창리층과 마전리층 그리고 이를 후기에 관입한 백악기 석영반암이 주로 분포하며 드물게 염기성 맥암이 발달한다(그림 2; Kim and Park, 1985). 마전리층은 조사지역의 남서부에 발달하며 구성 암석은 결정질 석회암, 석회규산염암, 흑색 천매암 등이며 본 연구지역의 남서부에 분포하며 동쪽으로 화강암과 접한다. 결정질 석회암의 구성광물은 방해석, 석영, 백운모, 흑연질 유기물로 구성되며 재결정작용이 현저하다. 석회규산염암의 구성광물은 석영, 투회석, 투감섬석, 양기석 등으로 구성되어 있다. 창리층은 연구지역의 중앙에 넓게 분포하며 암회색 내지 흑색 점판암과 운모 편암으로 구성되며 흑색 점판암 내에는 우라늄을 함유하는 흑연질 점판암이 협재한다. 점판암류의 주 구성광물은 석영, 백운모, 흑운모, 견운모, 흑연질 유기물, 황철석, 티탄철석, 저어콘 등으로 구성되어 있으며, 흑운모, 홍주석, 황철석 등이 반점으로 나타난다. 편암류의 주 구성광물은 석영, 백운모, 흑운모, 녹니석, 사장석이며 황철석, 적철석, 전기석, 견운모 및 저어콘 등이 부성분광물로 나타난다. 흑색 점판암에 협재되는 흑연질 점판암층은 폭이 약 15 m에 달하나 팽축 현상이 심하여 최저 2~3 m에서 최고 38 m에 달하는 곳도 있다(Kim and Park, 1985). 화

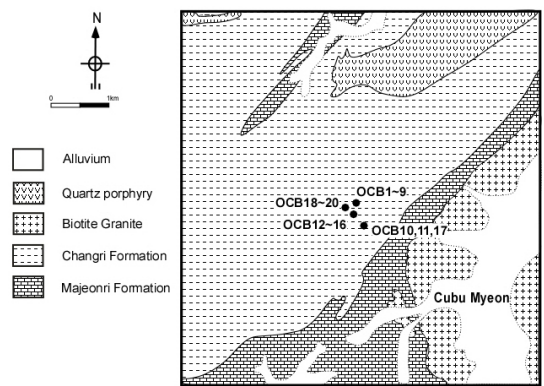


Fig. 2. Geological map of the Chubu area (Kim and Park, 1985) and the locations of sampling sites.

강암은 조사지역의 남서부에 발달되어 있으며, 대전-금산 간 구조선을 따라 광범위하게 분포한다.

2.2 시료

덕평지역에서는 문주리층의 흑색점판암, 흑연질 점판암과 천매암을 대상으로 ODP 1~5는 부수향, ODP 6~7은 계경향, ODP 8은 분향, ODP 9~12는 덕평초등학교 북서쪽 계곡, ODP 13~20은 북향, ODP 21은 한성향, ODP 22~24는 꽃봉향 그리고 ODP 25와 27은 요평마을 노두에서 이루어 졌다(그림 1).

추부지역에서는 창리층의 흑연질 점판암과 흑색 점판암을 대상으로 만안산 푸른 학습원 부근 노두에서 OCB 1~9, 추부터널 안쪽 250 m 중간지점에서 OCB 10, 11, 17, 터널입구에서 OCB 12~16을 그리고 대전 방향 국도변에서 OCB 18~20 시료를 채취하였으며(그림 2), 상기 시료 중 분석된 대표시료는 표 1에 기재하였다.

3. 연구방법

채취한 시료의 분석은 시료의 특성을 고려하여 원암을 이용하여 총유기물의 함량 측정, 광학 현미경 및 라만 마이크로스펙트로메트리 분석을 실시하였다. 한편 원소분석, X-선 회절분석 및 투과전자현미경 분석은 추출 유기물(케로젠)을 사용하였으며, 유기물은 프랑스국립석유연구소(I.F.P)에서 Durand *et al.* (1972)이 제안한 방법(HCl-HF)에 의한 자동 케로젠 분리를 사용하여 추출하였다. 주사전자현미경 분석은 원암 및 추출 유기물(케로젠) 시료 모두를 사용하였으며, 총 유기탄소(TOC) 함량 측정 및 원

소분석을 제외한 모든 분석은 프랑스 국립과학연구센터(CNRS)에 분석을 의뢰하였다.

3.1 총 유기탄소 및 원소분석

총 유기탄소 함량 측정은 프랑스 국립석유연구소(I.F.P.)에서 LECO 탄소측정기를 사용하여 수행하였다. 추출 유기물(케로젠)에 대한 탄소, 수소, 산소, 질소, 유황 및 잔류물에 대한 원소분석은 프랑스 ATX사에 의뢰하여 분석하였다.

3.2 X-선 회절분석

추출 유기물(케로젠) 분말시료에 대한 X-선 회절분석은 니켈 필터를 사용한 구리파장(Cu-K α , 1.5418 Å)의 X-선을 이용하였으며, Debye-Scherrer법과 회절분석법을 수행하였다.

Debye-Scherrer법은 분말 시료를 가느다란 유리에 붙여 Ewald 구의 중심 상에 위치하도록 하여 사진을 촬영하였다. 이 방법의 이점은 0°에서 180°까지 X-선을 입사하여 각 hkl값을 측정할 수 있으며, 특히 X-선 회절분석에서 잘 나타나지 않는 hk \bar{c} 의 선명한 모듈레이션(modulation)을 얻을 수 있다. 사용한 X-선 회절분석기는 d_{002} 값이나 P (Probability of graphitization) 값을 자동적으로 얻을 수 있다. 정확한 d_{002} 의 최대 피크 점을 측정하는 것은 유기물의 진화정도를 판단하는데 매우 중요한 요소이다. 따라서 X-선 회절분석시마다 최대 점의 위치 이동(shift)이 일어나기 때문에 일반적으로 Si 표준시료($d_{111}=3.135$ Å)와 분석시료를 혼합하여 측정된 후 이를 보정하여 정확한 유기물의 최대점 위치를 측정하였다. P 값의 측정은 Franklin (1951), Maring *et al.* (1965)와 Marie *et al.* (1970)들이 제안한 $l=1$ 과 $l=2$ 사이의 11 \bar{c} 적분 계산에 의해서 얻어진다. 이상의 두 방법은 탄화도가 높은 유기물을 연구하는데 매우 중요하다. 일반적으로 P값을 측정하는 경우 황철석이 잔류할 경우 P값은 항상 높게 나타나며, 금홍석이 잔류할 경우에는 낮게 계산된다. 또한 석영($d_{101}=3.34$ Å), 운모($d_{003}=3.36-3.37$ Å)가 분석시료에 함유되어 있을 경우에는 탄화유기물의 d_{002} 의 값과 간섭하여 정확한 측정치를 구할 수 없다(Oh, 1987).

3.3 광학현미경 및 주사전자현미경 분석

광학현미경 분석(OM)은 MPV 2 Microphotometer

가 부착된 LEITZ Orthoplan Microscope를 사용하였으며 반사광을 이용하여 원암을 이용하여 제작한 연마편 시료를 관찰하였다. 연마편의 유기물을 관찰하는 목적은 유기물의 타입을 결정하기 위한 마세랄의 구성성분 파악, 비트리나이트의 반사도를 측정하여 진화도 결정, 유기물과 기타 광물의 분포 형태와 그들의 상호관계 파악, 유기물의 광학적 특성 파악 및 유기물에 발달된 미세구조와 진화도와 상호관계 등이다. 연마편 관찰의 단점은 유기물이 세립(5 μ m) 이거나 구조운동에 의해 변형되어 있을 경우에는 정확한 반사도를 측정할 수가 없다.

주사전자현미경(SEM) 분석은 JEOL JSM-840을 사용하여 광학현미경 관찰에서 확인된 유기물에 대한 미세 입자크기 및 형태와 광물과 상호관계를 확인하기 위하여 연마편과 추출된 유기물을 이용하여 분석하였다.

3.4 투과전자현미경

투과전자현미경(TEM)은 필립스의 EM 400 기종을 사용하여 실시되었다. 진화가 많이 된 유기물 즉 석탄 또는 흑연에 적용된 TEM 분석기법은 Boulmier *et al.* (1982)와 Rouzaud and Oberlin (1990)이 포괄적으로 잘 설명하였다. 사용된 TEM 분석기법은 미세구조 정보를 얻을 수 있는 투과된 전자빔만으로 영상을 형성하는 명시야상(bright field image), 투과된 전자빔을 차단하고 회절된 전자빔을 이용하여 영상을 형성하는 암시야상(dark field image) 분석을 수행하였다. 또한 결정구조 내 원자 및 분자 배열정보와 흑연화 정도를 알 수 있는 제한시야 전자회절(selected area electron diffraction) 분석 및 방향족 층의 단면 영상을 얻을 수 있는 002 격자면상(lattices fringe)분석도 병행하였다.

3.5 라만 마이크로스펙트로메트리

라만 마이크로스펙트로메트리 분석기기는 Jobin-Yvon 사 U1000형 라만 스펙트로메터와 Olympus사 광학현미경으로 구성되어 있다. 연구에 이용한 방사선은 COHERENT사의 INNOVA 90형 아르곤 이온 레이저로 514.5 nm 청색광이며 최대출력은 2.6W이다. 라만 스펙트럼은 광학현미경의 100배율을 이용하였으며 스펙트럼 해상력은 4.6 cm^{-1} 이며 레이저 80 내지 100 mW를 사용하였다. 분석시간은 1초당 1 cm^{-1} 이며 유기탄소에 투과된 레이저 빔의 크기는 1

Table 1. Total organic carbon (T.O.C.) analyses of the Samples from Deogpyeong and Chubu areas.

Deogpyeong area			Chubu area		
Sample No.	Rock Types	T.O.C. (%)	Sample No.	Rock Types	T.O.C. (%)
ODP 1	Black Schist	15.5	OCB 1	Dark grey Schist	3.7
ODP 3	Black Schist	20.7	OCB 4	Graphitic Schist	44.5
ODP 5	Black Schist	11.5	OCB 6	Black Schist	11.8
ODP 11	Graphitic Schist	45.5	OCB 9	Black Schist	8.6
ODP 14	Phyllite	11.1	OCB 10	Black Schist	2.1
ODP 15	Graphitic Schist	31.6	OCB 11	Black Schist	2.2
ODP 19	Graphitic Schist	33.8	OCB 12	Black Schist	9.4
ODP 20	Phyllite	23.0	OCB 13	Dark grey Schist	3.1
ODP 21	Black Schist	12.3	OCB 14	Black Schist	3.9
ODP 22	Black Schist	12.8	OCB 15	Dark grey Schist	3.2
ODP 23	Graphitic Schist	34.3	OCB 18	Graphitic Schist	28.4
ODP 26	Graphitic Schist	46.9	OCB 19	Black Schist	12.0

μm 이다(Lespade, 1982). 라만 스펙트럼의 분석구간은 $1000\text{ cm}^{-1} < \Delta\nu < 1800\text{ cm}^{-1}$ 으로 1580 cm^{-1} 에서 나타나는 띠는 흑연의 E2g상이며, 1350 cm^{-1} 에서 크고 비대칭으로 나타나는 띠는 구조결함을 나타내는 것이다(Benny *et al.*, 1985).

4. 연구결과

4.1 총 유기탄소 함량 및 원소분석

표 1은 덕평 및 추부지역의 시료 중에서 대표되는 24개 시료에 대해 총 유기탄소 함량을 나타낸다. 덕평 지역 시료들의 총 유기탄소의 함량은 11.1~46.9%로 비교적 높은 편이며, 추부지역 시료는 2.1~44.5%를 나타내나 2개 시료를 제외한 대부분의 시료들의 총 유기탄소의 함량은 9.4%이하로 대체적으로 낮다. 전체적으로 보아 덕평지역의 시료들이 추부지역 시료 보다는 총 유기탄소 함량이 높음을 알 수 있다(표 1). 또한 상기 시료로 부터 유기물(케로젠)을 추출하여 그중 10개 시료에 대한 원소분석을 실시한 결과, 분석된 OCB 9 시료를 제외한 모든 시료가 99% 이상의 매우 높은 탄소 함량을 나타낸다. 따라서 추부 및 덕평지역에서 채취된 시료들은 유기물 진화의 최종 단계인 흑연에 도달하였음을 알 수 있다(Teichmüller *et al.*, 1979). OCB 9, 11 및 18 시료들이 다른 시료보다 산소 함량 값을 높이 나타나는 데 이는 도로변 노두에서 채취된 시료로서 풍화 변질

Table 2. Elemental analyses of the samples from Deogpyeong and Chubu areas.

Sample No.	T.O.C. (%)	Elemental Analysis (%)				
		C	H	O	H/C	O/C
ODP 1	15.5	99.47	0.05	0.05	0.026	0.003
ODP 5	11.5	99.21	0.05	0.69	0.006	0.005
ODP 11	45.5	99.61	0.20	0.20	0.006	0.002
ODP 20	23.0	99.53	0.09	0.38	0.012	0.003
OCB 1	3.7	99.12	0.05	0.77	0.006	0.006
OCB 4	44.5	99.40	0.05	0.05	0.006	0.004
OCB 6	11.8	99.08	0.05	0.82	0.006	0.006
OCB 9	8.6	98.41	0.05	1.38	0.006	0.010
OCB 11	2.2	99.00	0.15	1.90	0.020	0.015
OCB 18	28.4	99.00	0.14	1.24	0.013	0.009

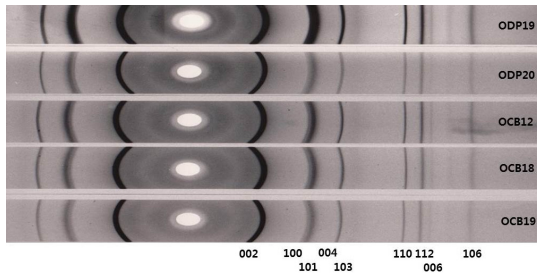
또는 오염에 기인된 것으로 해석된다(표 2).

4.2 X-선 회절분석

대표적인 시료의 Debye-Scherrer의 사진 기록은 그림 3과 같이 흑연의 특징인 hkl 고리가 매우 선명하게 잘 나타난다. 한편 X-선 회절분석으로 얻어진 결과는 표 3과 표 4에 제시하였다. d_{002} 피크의 모양은 매우 좁고 가늘며 거의 대칭을 이루고 있다. $d_{002} = 3.359\text{ \AA}$ 전후의 값을 일정하게 나타낸다. 또한 분석된 시료들의 흑연화 정도 P 값은 0.7에서 0.8으로 일반적으로 높게 나타났다. 그러나 ODP 14 및 ODP

Table 3. D-spacing (d_{002}) and P values of the original and heated samples from the Deogyong area.

Samples	Original		Heated (2800°C)	
	d_{002} (Å)	P	d_{002} (Å)	P
ODP 1	3.359	0.78	-	-
ODP 5	3.360	0.83	3.359	0.75
ODP 3	3.361	0.87	3.358	0.79
ODP 11	3.360	0.72	3.359	0.78
ODP 14	3.359	0.84	3.358	0.80
ODP 15	3.359	0.89	3.359	0.80
ODP 19	3.359	0.76	3.360	0.80
ODP 20	3.360	0.78	3.360	0.80
ODP 21	3.361	0.82	3.360	0.79
ODP 22	3.359	0.78	-	-
ODP 23	3.360	0.75	3.360	0.76
ODP 26	3.360	0.73	3.360	0.76

**Fig. 3.** Diagrams of X-ray diffraction analysis (Debye-Scherrer rings).

15 시료는 다른 시료에 비해 P값이 0.89 및 0.84로 높게 나타나는데 이는 시료에 포함된 황철석에 기인한 것이다. 한편 OCB 11 및 OCB 15 시료는 P 값이 매우 낮게 나타나거나 측정되지 않는데 이는 시료에 금홍석이 포함되어 있기 때문이며, OCB 10 및 OCB 14 시료는 비교적 낮은 값을 나타내는데 이는 황철석과 금홍석을 함유하고 있기 때문이다. 이러한 광물들은 1,000°C 이상으로 열처리를 하면 제거되고 P 값은 거의 정상적인 값을 나타낸다(표 3, 4).

4.3 광학현미경 분석

덕평지역 시료들의 총 유기탄소의 함량은 11.1~46.9%로 비교적 높은 편이나, 추부지역 시료들은 상대적으로 총 유기탄소의 함량 낮다(표 1). 박편시료의 관찰에서 나타나는 유기탄소들은 거의 분산 형태

Table 4. D-spacing (d_{002}) and P values of the original and heated samples from the Chubu area.

Samples	Original		Heated (2800°C)	
	d_{002} (Å)	P	d_{002} (Å)	P
OCB 1	3.358	0.81	-	-
OCB 4	3.359	0.80	-	-
OCB 6	3.360	0.79	3.359	0.80
OCB 9	3.358	0.80	3.358	0.81
OCB 10	3.359	0.68	3.359	0.80
OCB 11	3.359	0.34	3.359	0.78
OCB 12	3.359	0.78	3.358	0.80
OCB 13	3.358	0.77	3.358	0.80
OCB 14	3.359	0.68	3.359	0.79
OCB 15	3.359	ND	3.358	0.80
OCB 18	3.359	0.72	3.359	0.80
OCB 19	3.359	0.75	3.359	0.79

로 발달되어 있으며 입자의 크기는 매우 작기 때문에 연마가 잘 이루어지지 않은 시료는 해상력이 매우 낮다(그림 4c). 모든 시료들은 편리가 발달한 정도의 차이는 있으나 비교적 덕평지역 시료 보다는 추부지역 시료가 편리구조가 잘 발달해 있다(그림 4c, 4d). 박편의 관찰 결과 다음과 같이 3가지 유형의 유기탄소 함유 형태를 구분할 수 있다.

1) 모자이크(mosaic) 형태: 이방성을 띠는 유기탄소 입자가 1~수 μm 로 기질 광물 사이에 분산되어 있거나 군집의 형태로 나타나며 분석된 시료들의 주를 이루고 있다.

2) 메조파스(mesophase) 형태: 유기탄소가 광물의 간극사이로 연속적으로 발달되거나 몇 개의 입자가 유착되어 있는 형태로 이들은 리본 같은 좁은 통로에 연속으로 발달되거나(그림 4b, ODP 26), 구형(sphere)으로 다소간에 서로 유착되어 있다(그림 4a, ODP 11).

3) 고립 또는 군집된 형태: 입자의 크기가 5 μm 이하로 고립되어 있거나 군집을 이루는 구형의 유기탄소로 존재한다. 이 구형 형태는 ODP 11 시료에서 기질에 발달되는 간극에서 잘 관찰되는데 이는 간극을 따라 유기탄소가 이동한 현상을 잘 나타내 주고 있다(그림 4a). 특히 기질 내에 고립되어 나타나는 구형 유기탄소는 다른 유기탄소와 유착되어 발달되지 않는다. 이 형태의 유기탄소의 입자 크기는 매우 작기

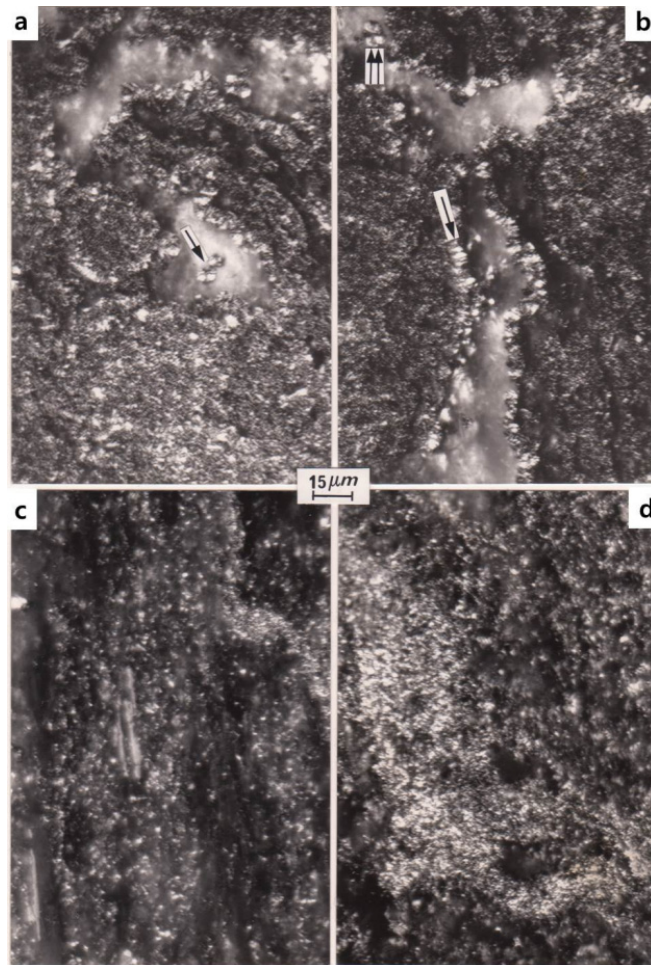


Fig. 4. Optical micrographs obtained under crossed polarizers. a) ODP 11 : Isolated sphere carbon (single arrow). b) ODP 26 : Edging continuous carbon, lining cracks (single arrow) and coalesced spheres (double arrow). c) OCB 10 : widely dispersed carbon materials (luminous spots) in the mineral matrix with N-S directed foliations. d) OCB 13 : Characteristic plastic phase migration; fairly concentrated carbon materials without any foliation. The carbon material is fairly concentrated and presents no well developed foliation. These clusters indicate a plastic phase migration.

때문에 방사상(radial) 형태인지 동심원(concentric) 형태인지 구별하는 것이 매우 어렵다(Ayache, 1987; Ayache *et al.*, 1990).

4.4 주사전자현미경

주사전자현미경 관찰결과, 덕평지역 및 추부지역 시료들에 함유되어 있는 유기탄소의 입자들은 구형을 나타내며 수 μm 정도의 크기로 압밀되어 있거나 유착되어 있고(그림 5a, 5c), 그림 5a에서 짧은 화살표는 엽층형태의 입자도 보여준다. ODP 11, ODP 23

및 ODP 26 연마편 시료에서 보여주는 유기탄소 입자들이 국부적으로 집중되어 있을 경우 일반적으로 구형의 입자들이 잘 관찰된다. 그림 5a에서 보여주는 구형의 유기탄소 형태를 확대하여 관찰하면 그 형태가 매우 확실하게 나타난다(그림 5b). 반면 OCB 시료와 같이 유기탄소의 함량이 낮고 암석 내에 분산되어 엽리작용을 받은 경우에는 구형 형태의 유기물이 납작하게 변형되며 2 μm 이하의 작은 디스크 형태로 겹쳐 있는 현상을 보인다(그림 5c). 비교를 위하여 그림 5d는 공주지역의 선캄브리아기 변성퇴

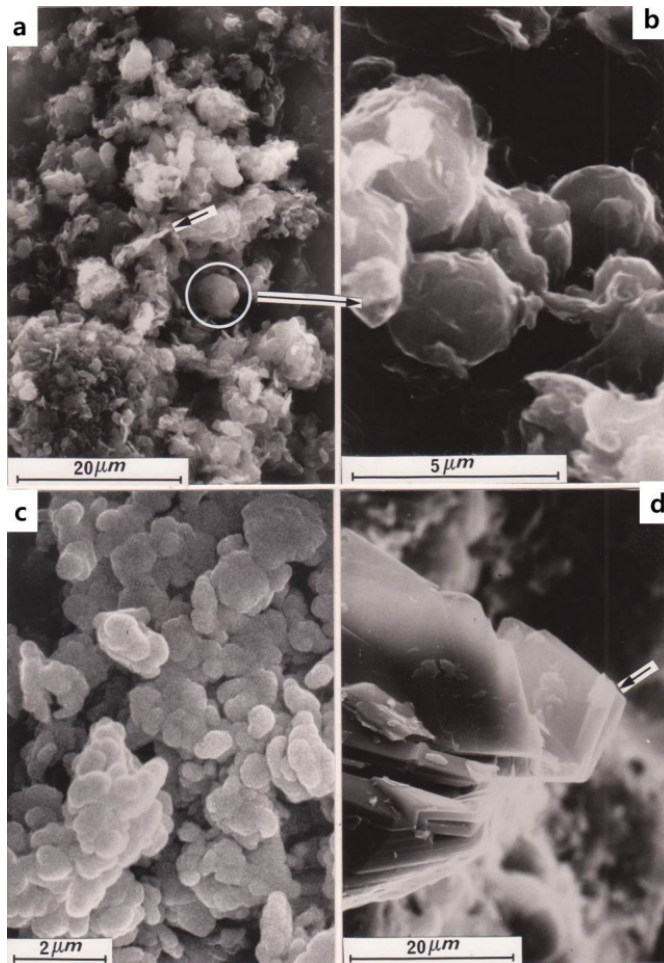


Fig. 5. Scanning electron micrographs (a, b = ODP 23, c = OCB 10): a) Low resolution (small scale) encircled spherical particle (lamella particle is indicated by an arrow). b) High resolution (large scale) closed-up encircled spherical particle in the a). c) Circular form of small lamella particles (presumably derived from crushed spheres). d) Hexagonal mono-crystallized large lamella graphite (single arrow).

적층에서 채취된 KY 1 시료로 판상의 형태를 잘 보여주며 입자의 형상은 육각 형태를 보여준다.

4.5 투과전자현미경

투과전자현미경 관찰 결과, 덕평지역 시료와 특히 추부지역 시료의 유기탄소는 전체적으로 디스크(disk) 형태를 나타내며, 문경탄전의 육상 고등식물 기원의 흑연화 과정에서 나타나는 형태의 유기탄소(Oh, 1987; Oh *et al.*, 1991)는 관찰 되지 않는다. 덕평과 추부지역 시료들은 다음과 같이 3가지의 유형의 유기탄소 상으로 분류할 수 있다.

1) 큰 엽상(lamella) 형태 : 이와 같은 유기탄소는

유착된 메조파스(mesophase)나 광학현미경 분석에서 모자이크 형태나 가장자리에 나타나는 형태의 구형의 입자가 부서진 것으로부터 유래되었으며, 기계적으로 매우 약해 부서지기 쉽다. 덕평지역 시료 중 1/3 가량이 이 형태의 입자들이며 추부지역 시료의 경우 전체적으로 10% 이하로 나타난다.

2) 작은 디스크(disk) 형태 : 1,000~5,000 Å의 크기의 유기탄소(그림 6a, 1개 화살표)로 원형이나 육각형 모양으로 관찰된다. 이 형태는 특히 추부지역 시료에서 많이 나타나며, 입자 형태는 단결정의 모양으로 쉽게 관찰된다. 이러한 작은 디스크 형태는 덕평지역 시료들에서는 30% 내지 50% 정도를 차지

하며, 추부지역 시료들에서는 거의 주를 이룬다. 또한 엽리 구조가 잘 발달된 시료에서 매우 잘 관찰된다.

3) 구형 또는 구형의 다면체 형태 : 유기탄소(그림 6a, 2개 화살표)는 크기가 2000 Å ~ 수 μm을 나타낸다. 이들 구조는 동심원 형태로 검정탄소(black carbon)에서 나타나는 다각형 형태와 비교된다(그림 7a, 7b). 그림 6c는 002의 암시야상으로 동심원 구조(그림 8b)와 방사상 구조(그림 8c)의 잘린 형태를 보

여준다. 엽상 구조의 유기탄소(그림 8a)는 방향족 층의 방향(화살표)으로 잘린 형태(그림 6c, 3개 화살표)를 보여준다. 그림 6c의 입자에서 2개의 밝게 빛나는 삼각형 영역(2개 화살표)과 방향족 층 방향에 수직으로 향한 유기탄소는 이 입자가 동심원 구조라는 것을 증명해 준다.

다면체의 002 격자 줄무늬상(lattice-fringes image)의 내부 구조에서는 동심원 구조가 선명하게 관찰되

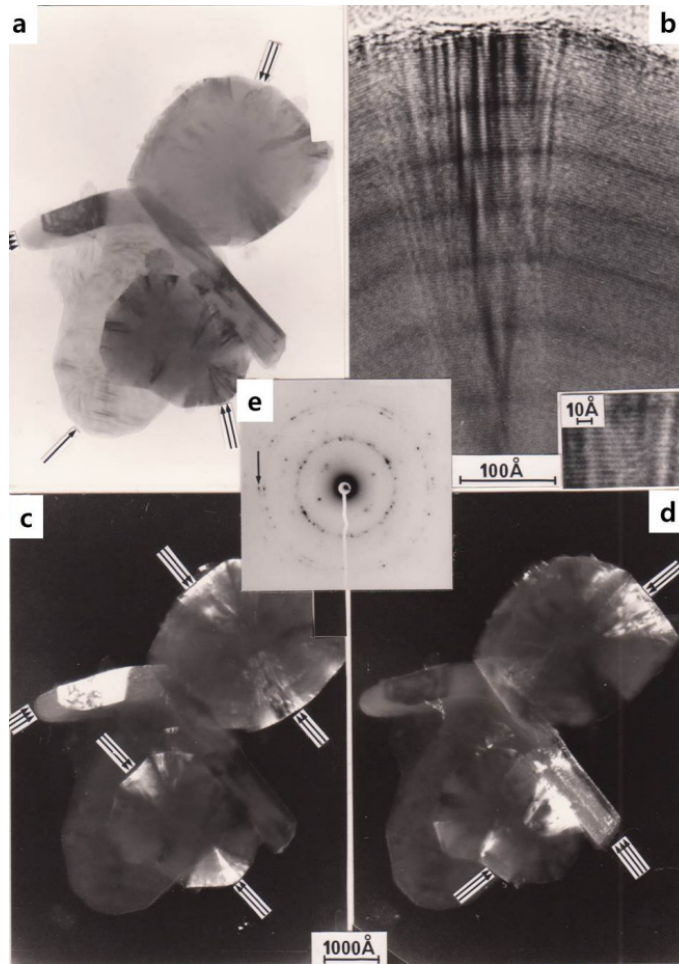


Fig. 6. Transmission electron micrographs of carbon materials in ODP 11 showing disc type graphite and concentric texture particles: a) Bright field image : small disk of graphite placed a flat (single arrow) spherical particle to concentric texture (double arrow), Bragg dark fringes into the center of the particle, graphite particle placed on the slice (triple arrow). b) Obtained 002 lattice-fringes image of a spherical particle, visualization of concentric texture and local flatness in layers, and concentric dark fringes (evidence of several stages of growth of the particle). c) and d) 002 dark field image corresponding to a) (2 positions of the diaphragm 90°) : - The disk of graphite placed a flat layer remains always extinguished. - The graphite particle placed on the slice strongly illuminated (triple arrow). - Concentric particles show two sectors (double arrows) vertically opposite, and oriented perpendicular to the illuminated graphite particle. e) SAD pattern of 112 reflections (single arrow) show graphite occurrence.

며 아울러 성장과정도 잘 관찰된다(그림 6b). 특히 일련의 추부지역 시료들은 주위에 대규모로 관입된 화강암의 영향으로 열 변질을 높게 받아 흑색탄소(black carbon)를 2,800°C로 가열하면 나타나는 현상과 같이 방사상 구조나 동심원의 다각형 구조가 많이 나타난다. 다각화작용은 아마도 결어긋남(decohesion)의 결과에 기인하여 방향족 층이 편편하게 진화되는 현상에서 수반되는 것이다. 치밀한 동심원 중앙부의 핵은 하나 내지 여러 개의 동심원 구조 외벽으로부터 분리된 것이다(그림 9a, 9b). 이들 동심원 구조의 입자들은 일련의 덕평지역 시료들에서는 20~40% 정도 차지하고 있으며, 추부지역 시료들에서는 10~30% 정도 나타난다. 이들 입자의 함유량은 총 유기탄소의 함량이 높은 시료(ODP 23, OCB 18, OCB 19)에서 많이 나타나며 유기탄소가 기질에 분산되

어 나타나는 경우에는 매우 낮다. 편리작용이 심한 시료들(OCB 10, OCB 11)에서 관찰되는 입자들은 대부분이 깨져있는 양상을 보인다(그림 9b, 9c, 9e). 편편한 엽상 형태는 동심 다면체 구조의 벽면들이 분리되면서 만들어지며, 매우 치밀한 작은 핵은 중심에 남아 있다(그림 9a, 9b). 그림 9d에서 보여 주듯이 각각의 이러한 형상들은 다결정 흑연 입자들로 형성되어 있다. 그림 9의 사진들은 동심원 입자와 마지막 단계인 원형이나 육각형태의 흑연 결정(그림 9f) 사이의 일련의 과정을 보여준다.

4.6 라만 마이크로스펙트로메트리

분석된 시료들의 스펙트럼은 다음과 같이 세 가지 형태(type)의 특성을 나타내며, 전체적으로 3 가지 띠를 보여준다(그림 10).

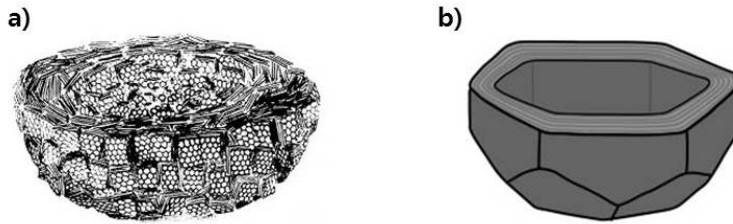


Fig. 7. a) Model of a carbon black showing concentric microtexture (onion skin textures). b) Model of a polyhedral graphitic carbon black.

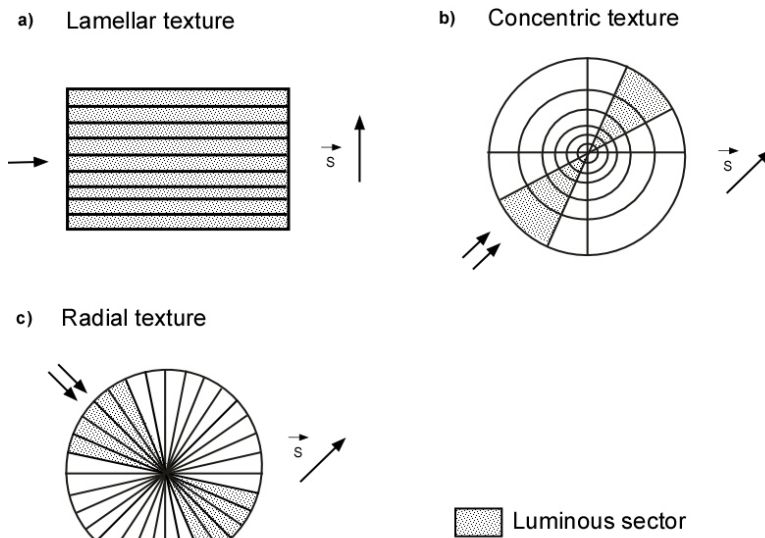


Fig. 8. 002 dark field images of carbon organized in lamellar (a), concentric (b) and radial (c) textures.

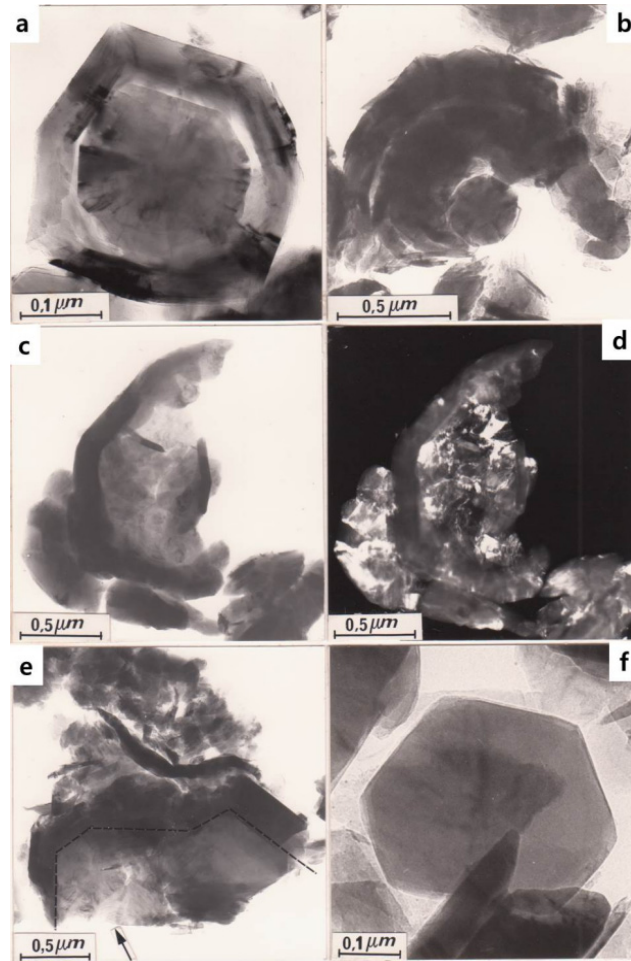


Fig. 9. Transmission Electron Micrographs: a) OCB 4 : "Intact" form of concentric particle. After polygonization, the particle is present in the form of encased polyhedral. b) OCB 4 : Fragmentation of the particle, the central polyhedron remaining intact. c) ODP 19 : broken polyhedron ; its faces consist of polycrystalline graphite. d) Image of 110 dark field: corresponding to c), visualization of polycrystalline graphite on the faces placed a flat layer. e) OCB 9 : illustration of the detached lamella polycrystalline graphite (single arrow) from the faces of the polyhedron fragments, the dotted line emphasizes the break line. f) OCB 14 : Morphology of hexagonal graphite crystal.

- 1) 형태(type) 1 : $1,350 \text{ cm}^{-1}$ ("결함" 띠)에 위치하는 띠로 약간 비대칭적임
 - 2) 형태(type) 2 : $1,580 \text{ cm}^{-1}$ (흑연 E2g 띠) 띠로 매우 좁고 대칭적임
 - 3) 형태(type) 3 : $1,620 \text{ cm}^{-1}$ 에 위치하며 강도가 미약하며 해상력도 낮음
- 덕평지역 시료들은 대체로 형태(type) 2와 형태(type) 3 띠를 나타내나, ODP 11, ODP 23 및 ODP 26 시료와 같이 유기탄소 함량이 많은 시료는 형태(type) 2와 3보다 주로 형태(type) 1의 띠가 많이 나타난다(그림 10). 추부지역 시료들은 전체적으로 덕

평지역 시료보다 더 진화된 형태의 띠를 보인다. 유기탄소의 함량이 비교적 낮은 추부지역 시료들은 거의 형태(type) 3으로 나타나나 그 중에서도 상대적으로 유기탄소의 함량이 높은 OCB 18과 OCB 19의 시료는 형태(type) 2와 3가 혼재되어 있음을 보여 준다. 모든 시료들은 형태(type) 1에서 형태(type) 3까지의 형태들을 보여주는데 이들의 $1,580 \text{ cm}^{-1}$ 띠의 반폭 값은 대체로 16 cm^{-1} 내지 20 cm^{-1} 이며, $1,350 \text{ cm}^{-1}$ 띠의 반폭 값은 40 cm^{-1} 로 매우 일정하며 궁극적으로는 이 띠만이 남게 된다. $1,620 \text{ cm}^{-1}$ 띠는 형태(type) 1에서 형태(type) 3으로 변화되면서 점진적

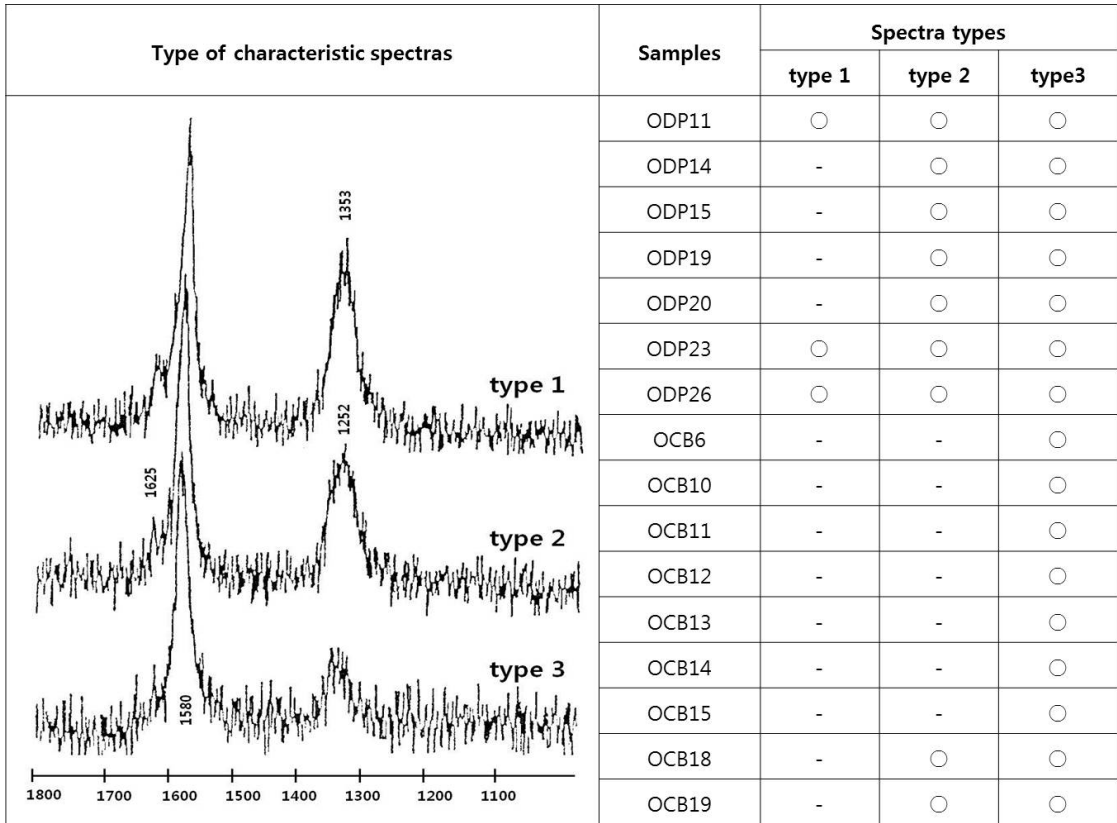


Fig. 10. Results of the Raman microspectrometry on ODP and OCB samples.

으로 사라지고 해상도가 매우 낮게 나타난다.

5. 토 의

덕평지역과 추부지역에서 채취된 모든 시료에 함유된 유기탄소는 흑연화 되어 있음을 확실히 알 수 있다. 그 증거는 X-선 회절분석 결과 d₀₀₂의 층간 간격이 3.36 Å 미만이며, 흑연화 정도 P 값이 0.7 이상을 나타낸다. 라만 마이크로스펙트로메트리 분석에서도 결함 밴드인 1,350 cm⁻¹은 감소하고 흑연의 E_{2g} 띠(1,580 cm⁻¹)가 좁고 강하게 나타난다. 한편 고해상 투과전자현미경에서는 평안계 시료에서 나타나는 마이크로(micro) 또는 마크로(macro)한 공극은 확실히 보이지 않으며, 국부적으로 나타나는 흑연화 현상도 전혀 나타나지 않는다. 오직 동심원, 다각형 형태와 큰 엽상 형태 또는 작은 디스크형 흑연만이 결정화되어 나타난다. 고해상 투과전자현미경에서 나타나는 상들(그림 9e)은 엽상 형태의 흑연

과 다각형 동심원 입자의 면들과의 관계를 잘 나타내 주고 있다.

이와 같이 덕평과 추부지역의 시료에 함유된 유기탄소는 문경 지역의 시료들에서 나타나는 고등식물 기원의 유기탄소와 그 형태가 전혀 다른 양상을 보인다(Deurbergue *et al.*, 1987; Oh, 1987; Oh *et al.*, 1991). 따라서 덕평지역과 추부지역의 변성퇴적암에 함유된 유기탄소 연구 결과 두 가지 의문이 제기된다:

- 1) 문경지역에서 나타나는 고등식물 기원의 유기탄소의 형태는 나타나지 않고 동심원, 구형 및 다면체 등 특정한 형태만이 나타나는가?
- 2) 이러한 다면체 형태로부터 흑연 형성과정 기작은 무엇인가?

5.1 흑색탄소(black carbon)

자연에서 산출되는 흑색탄소(black carbon) 입자는 인공 흑색탄소와 미세구조학적으로 매우 동일하다

(Oberlin *et al.*, 1975; Boulmier, 1976; Bonijoly, 1980; Boulmier *et al.*, 1982). 이러한 입자는 일반적으로 양파 껍질과 같은 구조를 가지고 있다. 실제로 이러한 구조의 인공 흑색탄소는 기체 상태의 고온에서 얻어지며(Heidenreich *et al.*, 1968), 또한 실험실에서는 600°C 이하 300bar 압력 하에서 불순물(인산염)을 첨가하여 획득할 수 있고, 또 다른 방법은 *Botryoccus braunii* 조류를 전구물질로 규소와 혼합하여 사용하는 방법이 있다(Ayache, 1987; Ayache *et al.*, 1990). 이 실험에서의 입자 형태는 항상 규소를 함유하는 방사선 구조의 메조파스가 수반되며, Brooks and Taylor (1965)의 메조파스와 유사하다.

5.2 덕평 및 추부 지역의 유기탄소 입자

이들 지역의 시료에서 나타나는 입자들은 거의 동심원 구조를 보이는데 구형에 가깝거나 다면체 형태를 나타낸다(그림 9). 이들 동심원 구조의 입자들은 탄소 층이 겹겹이 쌓여있는 형태를 보여 준다(그림 9a, 9b). 덕평과 추부 시료에서의 입자의 핵(그림 9a)은 Ayache가 실험한 결과와 유사하며(Ayache, 1987; Ayache *et al.*, 1990), 그 형성과정을 논리적으로 추론할 수 있다. 결론적으로 다음과 같이 덕평 및 추부 지역의 유기탄소 입자의 기원을 생각할 수 있다.

1) 덕평과 추부 지역의 시료에 함유된 유기탄소는 문경지역 등에서 나타나는 고등식물(higher plants) 기원의 유기탄소와는 전혀 다른 형태의 입자로 구성되어 있다. 따라서 이들 유기탄소의 기원은 고등식물이 전혀 퇴적되지 않은 환경이나 지질시대를 고려할 수 있다. 이들 시료들의 지질시대가 데본기 이전이라면 고등식물은 존재하지 않았을 것이고 오로지 유기탄소는 플랑크톤이나 조류(algae)등으로 부터 기원했을 가능성이 높다.

2) 퇴적암에 함유된 유기물은 온도와 압력의 영향으로 탄화수소류로 변한 후 이동하였거나 비투멘 상태로 농집되어 진화하였을 것이고, 탄화수소류의 진화는 여러 광물의 변성과 함께 병행하여 이루어졌을 것이다.

3) 광학현미경(OM)에서 관찰되는 단독의 구형입자, 연결된 입자 그리고 중첩되어 있는 입자들은 광물 간극의 벽의 가장자리를 따라 나타난다. 이는 플라스틱한 타르나 비투멘 상태로 간극을 따라 이동하

였을 가능성을 제시한다. 광학 현미경 관찰에 있어 이들 시료는 매우 작기 때문에 Brooks와 Taylor (1965)가 입증한 방사상 또는 동심원 구조인지 구별하기는 쉽지 않다.

5.3 흑연의 형성 원리

덕평지역과 추부지역에서 나타나는 “동심원 입자”는 변성작용 과정에서 다음과 같이 두 가지 유형의 변화를 나타내는 것이 확실하다.

1) 열적인 결과로 흑색탄소(black carbon)를 열처리 할 때 관찰되는 현상과 동일한 열적 효과가 나타난다. 지그재그로 결합된 구조 단위의 방향족 층이 평탄하게 퍼지면서 평면의 구면 다면체 형태로 점이적으로 변화한다(그림 7a, 7b), 이는 흑색탄소(black carbon)를 2,800°C로 열을 가했을 때 일어나는 현상과 동일하다. 층의 퍼짐 작용은 결어긋남 현상을 수반하며 다소간 겹겹이 쌓여 있는 다각형의 면들은 지속적으로 동심원 중심의 핵으로부터 분리된다. 그림 9는 이러한 변화의 형태를 잘 보여주고 있다.

2) 압력에 연관된 응력작용의 결과로 일어나는 변형으로 입자들이 일그러지거나, 납작해지거나 또는 압쇄된 형태가 관찰되는데 이는 완전한 다각형화작용의 말기에 도달하지 못한 결과로 해석된다. 덕평 지역 시료에서는 으스리진 구형 입자와 판상 조각 형태로 떨어진 입자를 관찰할 수 있다(그림 9e, 화살표로 표시).

추부시료는 다각형 작용(polygonization)이 매우 진척된 양상을 보이는데 이들은 기계적으로 매우 깨지기 쉽기 때문에 입자들이 부스러져 있다. 변형작용은 작은 엽상 구조의 입자를 형성하게 하는데 이는 다면체의 각각의 면에서 기원된 것이며(그림 9a), 둥그런 디스크 형태 또는 다각형 작용의 정도에 따른 육각형의 작은 흑연 결정체들로 나타난다(그림 9e). 투과전자현미경 관찰에서 깨어진 형태나 디스크 형태의 흑연은 광학 현미경 관찰에서 엽리구조의 발달된 정도에 따라 밀접한 관계가 있다. 유기탄소의 함량이 낮고 분산되어 있는 시료에서는 광학현미경에서 나타나는 여러 가지 상이나 투과전자현미경에서 나타나는 미세구조의 형태가 잘 관찰되지 않는다. ODP 18, ODP 19, OCB 23 및 OCB 26 시료들과 같이 유기탄소의 함량이 비교적 높은 시료는 엽리구조의 발달이 비교적 미약하며, 다수의 동심원 구조

가 약간 또는 거의 변형되지 않은 상태의 큰 입자 형태로 관찰된다. 반면 OCB 10과 OCB 11과 같이 유기탄소의 함량이 낮고 엽리구조가 잘 발달되어 있는 시료에서는 작은 디스크 형태의 흑연이 잘 관찰된다.

6. 결론

옥천변성대내 덕평지역의 문주리층과 추부지역의 창리층의 변성퇴적암에 함유되어 있는 유기물의 기원, 특성 및 진화 정도를 파악하기 위하여 다양한 분석을 실시하여 교차 해석하였다. 원소분석 분석 결과 99% 이상의 매우 높은 탄소 함량을 나타내며, X-선 회절분석결과 모든 시료들의 d_{002} 층간 간격인 최대 피크 점의 값은 3.359 \AA 전후이고 흑연화정도 P값은 0.7 이상으로 매우 높게 나타난다. 또한 투과전자현미경 분석에서 나타나는 002 격자 줄무늬상이나 제한시아 회절 분석과 라만 마이크로스펙트로메트리 분석에서 $1,350 \text{ cm}^{-1}$ 이 감소하고 $1,580 \text{ cm}^{-1}$ 이 강하고 얇게 나타나는 것은 덕평지역과 추부지역 시료에 함유된 유기탄소가 완전히 흑연화 되어 있음을 증명하는 것이다. 또한 상기 분석 결과 추부지역의 시료

들이 덕평지역의 시료 보다 흑연화(graphitization) 정도가 높고, 유기탄소의 함량이 낮은 시료가 많은 시료보다 진화도가 높다. 이는 옥천 변성대의 지역에 따라 변성도가 동일하지 않다는 사실과 매우 밀접한 관계가 있다.

광학현미경, 주사전자현미경 및 투과전자현미경 분석 결과 유기탄소 입자의 형태는 문경탄전 지역의 평안누층군과 대동누층군의 퇴적암에 함유되어 있는 고등식물의 입자 형태와 유기물의 진화경로가 매우 판이하게 나타난다. 연구지역의 시료에서는 고등식물 기원의 유기탄소는 전혀 나타나지 않고 다만 실험실에서 조류(algae)로 흑연화 과정을 실험한 형태의 입자만이 나타나며 진화형태가 매우 흡사하다. 따라서 이 지역의 유기물은 고등식물이 전혀 퇴적되지 않은 환경이나, 고등 식물이 지구상에 나타나기 전인 대본기 이전의 유기물로 사료된다. 덕평지역과 추부지역 시료의 흑연화과정의 메커니즘은 그림 11과 같이 추론할 수 있다. 유기물이 조류 기원이면 온도가 증가함에 따라 유기물은 탄화수소류 물질로 변화하여 공극이나 간극을 따라 이동하게 된다. 만약 이동이 불가능한 환경에서 압력과 온도가 증가하면 탄화수소류는 타르와 같은 물질로 변화하여 입자사이의 간극을 따라 남게 되고, 계속하여 진화하면 간극의 가장자리를 따라 메소파스의 구형 형태의 입자로 분포하게 된다. 또한 암석에 함유되어 있는 광물질은 유기물의 탄화작용(carbonization) 과정에서 동심원 구조의 입자의 형성을 유발케 하는 요인이 된다. 온도가 증가함에 따라 수천 \AA 의 평탄층의 다각형화 작용이 진행되고, 변성작용에 기인하여 다면체의 깨어짐이 수반되어 작은 디스크 형태의 흑연을 형성케 한다.

옥천변성대를 구성하고 있는 여러 변성퇴적암층 중 단지 덕평지역의 문주리층과 추부지역의 창리층에 대한 연구만이 수행되어, 옥천변성대 전체적인 유기물의 특성을 대표할 수 없다. 따라서 향후 다른 층에 대한 유기물 연구도 수행되어야만 종합적인 해석이 이루어 질 수 있다.

사 사

이 연구는 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원이 지원하는 “국제해저지각시추사업”

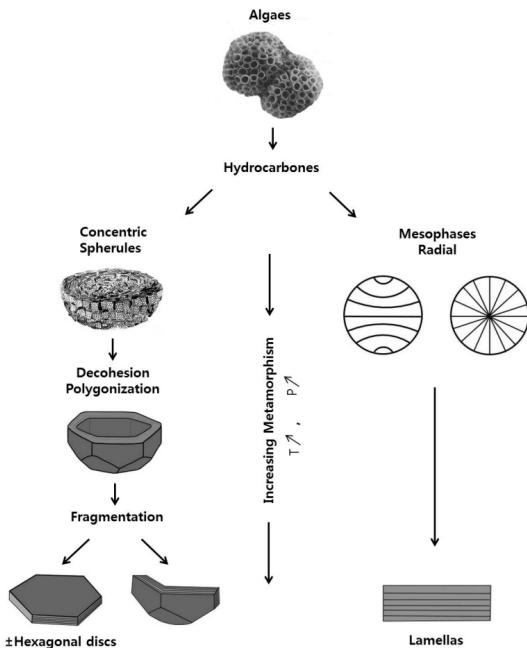


Fig. 11. Mechanism of the graphitization on the carbon materials of algae origin.

의 일환으로 수행되었다. 논문 심사과정에서 많은 검토와 조언을 하여 주신 심사위원께 진심으로 감사드린다.

REFERENCES

Ayache, J., 1987, Simulations thermiques de l'évolution des roches mères pétrolières. Pyrolyses de substances modèles. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Pau et Pays de l'Aour.

Ayache, J., Oberlin, A. and Inagaki, M., 1990, Mechanism of carbonization under pressure, part I: Influence of aromaticity (polyethylene and anthracene). Carbon, Vol. 28, Iss. 2-3, 337-351.

Ayache, J., Oberlin, A. and Inagaki, M., 1990, Mechanism of carbonization under pressure, part II: Influence of impurities. Carbon, Vol. 28, Iss. 2-3, 353-362.

Benny, C. and Rozaud, J.N., 1985, Characterization of carbonaceous materials by correlated electron and optical microscopy and Raman microscopy. Scanning electron microscopy, I, 119-132.

Bonijoly, M., 1980, Evolution des substances carbonées naturelles; formation du graphite. Thèse de Docteur de 3ème cycle, Université d'Orléans.

Bonijoly, M., Oberlin, M. and Oberlin, A., 1982, Possible mechanism for natural graphite formation, Int. J. Coal Geol., 1, 283-312

Boulmier, J.L., 1976, Etude structurale de quelques séries de roches sédimentaires carbonées par microscopie électronique a haute résolution. Détermination de critères d'origine et d'évolution de kérogènes. Thèse de Doctorat d'Etat, Université d'Orléans.

Boulmier, J.L., Oberlin, A., Rouzaud, J.N. and Villey, M., 1982, Natural organic matters and carbonaceous materials : a preferential field of application for Transmission Electron Microscopy. In : Scanning Electron Microscopy, IV, S.E.M. Inc., A.M.F., O'HARE (Chicago), 1523-1538.

Brooks, J.D. and Taylor, G.H., 1965, The formation of graphitizing carbons from the liquid phase. Carbon, 3, 185-193.

Deurbergue, A., Oberlin A., Oh, J.H. and Rouzaud, J.N., 1987, Graphitization of Korean anthracites as studied by transmission electron microscopy and X-ray diffraction. Int. J. Coal Geol., 8, 375-393.

Durand, B., Espitalie, J., Nicaise, G. and Combaz, A., 1972, Evolution de la matière organique insoluble (kérogène) des argiles du Toarcien du bassin de Paris. Rev. Inst. Fr. Pétrole, 27, 865-884

Durand, B. and Espitalie, J., 1973, Evolution de la matière organique au coure de l'enfouissement des sédiments. Cr. Acad. Sci. Paris, 276, 2253-2256.

Franklin, R.E., 1951, The structure of graphite carbons. Acta Cryst., 4, 253-261.

Heidenreich, R.D., Hess, W.H. and Ban, L.L., 1968, A test object and criteria for high resolution electron microscopy. J. Appl. Cryst., 1, 1-18.

Jeong, G.Y., 2006, Mineralogy and geochemistry of metaliferous black shale s in the Okcheon metamorphic belt, Korea: a metamorphic analogue of black shales in the South China block. Mineral. Deposita, v. 41, 469-481.

Jeong, G.Y. and Lee, S.H., 2001, Form of molybdenum in the carbonaceous black slates of the Ogcheon Belt. Jour. Miner. Soc. Korea, v.14, 52-57 (in Korean with English abstract).

Kim, J.H. and Park, J.K., 1985, Kolnami uranium deposits, central part of Ogcheon folded belt in the south east of Daejeon. KR-85-23, Geological investigation of uranium resources, KIER. 7-76.

Koh, H.J., 1995, Structural analysis and tectonic evolution of the Ogcheon Supergroup, Geosan, Central part of the Ogcheon Belt, Korea. Ph.D. Thesis, Seoul National Univ., 282.

Lee, C.H. and Lee, H.K., 1997, Geochemistry and mineralogy of metapelite and barium-vanadium muscovite from the Ogcheon Supergroup of the Deokpyeong area, Korea. Korean Soc. Econ. Environ. Geol., 30(1), 35-49 (in Korean with English abstract).

Lee, D.J., 1986, Mineralogy of low-grade uranium ores in the black slate of the Ogcheon Group, Korea. Joul. Korean Inst. Mining Geol., 19, 19-41.

Lee, J.H. and Kim, J.H., 1972, Geologic map of Geosan Sheet 1:50,000. Geological and Mineral Institute of Korea, 24.

Lee, S.M. and Kim, S.W., 1985, Uranium distribution patterns and U-mineral in the U-bearing clay slate of Ogcheon system. Jour. Korean Inst. Mining Geol., 18, 135-138.

Lee, S.M., Park, H.I., Kim, S.J., Park, B.S. and Lee, S.H., 1981, Genesis of the uranium deposits in the metasediments of Deogpyeong area, Geosan-gun. Jour. Geol. Soc. Korea, 17, 53-68 (in Korean with English abstract).

Lespade, P., 1982, Contribution à l'étude de la graphitiation des carbones par microspectroscopie Raman. Application aux matériaux composites carbon-carbone. Thèse docteur de Ingénieur Université de Bordeaux.

Maring, J. and Marie, J., 1965, "Apects structuraux de la graphitiation" In : Les carbones. GFEC. ed., Masson, Paris, 1, 129-192.

Marie, J. and Maring, J., 1970, "Graphitization of soft carbons" In : Chemistry and physics of carbon. Walker P. L. ed., Dekker M., Newyork.

Oberlin, A., Terriere, G. and Boulmier, J.L., 1975,

- Carbonification, Carbonization and graphitization as studied by high resolution electron microscopy. Tanso, part I, 80, 29-42.
- Oberlin, A., Terriere, G. and Boulmier, J.L., 1975, Carbonification, Carbonization and graphitization as studied by high resolution electron microscopy. Tanso, part II, 83, 153-170.
- Oh, C.H., 1986, Géochimie, minérale et organique, et métallogénie du gisement uranifère de Geosan, Bassin d'Ogcheon (Corée). Thèse docteur de l'université d'Orléans.
- Oh, C.H., Trichet, J., Oh, J.H. and Rouzand, J.N., 1990, Relation between the thermal behaviour and the structure of kerogen in the Goesan uranium deposit, Korea. Organic Geochemistry, Vol. 16, Issues 1-3, 609-619.
- Oh, C.W., Kim, S.W., Ryu, I.-C., Okada, T., Hyodo, H. and Itaya, T., 2004, Tectono-metamorphic evolution of the Okcheon Metamorphic Belt, South Korea: Tectonic implications in east Asia. Isl. Arc 13, 387-402.
- Oh, J.H., 1987, Etude structurale de la graphitisation naturelle (exemples de bassins Sud-Coréens). Thèse docteur de l'université d'Orléans.
- Oh, J.H., Rouzand, J.N., Deurbergue, A. and Kwak, Y.H. 1991, Structural study of graphitization in Moongyeong coalfield, South Korea. Bull. Soc. Géol. France, 162, 399-408.
- Rouzand, J.N. and Oberlin, A., 1990, The Characterization of coal and cokes by Transmission Electron Microscopy, in H. Charcosset (Ed.), Advanced Methodologies in Coal Characterization. Elsevier, 311-355.
- Shin, D.B. and Kim, S.J., 2011, Geochemical characteristics of black slate and coal slate from the uranium deposit in Deogyong area. Econ. Environ. Geol., 44(5), 345-357.
- Teichmüller, M., Teichmüller, R. and Bartenstein, H., 1979, Inkohlung und Illit-Kristallinität. Vergleichende Untersuchungen im Mesozoikum und Paläozoikum von Westfalen. Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf. 201-276.

투 고 일 : 2014년 10월 28일

심 사 일 : 2014년 10월 29일

심사완료일 : 2014년 11월 28일