

## 의성지역 경상누층군의 열적진화와 속성작용

### Thermal Maturation and Diagenesis of the Gyeongsang Supergroup, Euisong Area, SE Korea

손병국 (Byeong-Kook Son), 정태진 (Tae-Jin Cheong),  
오재호 (Jae-Ho Oh), 광영훈 (Young-Hoon Kwak)

#### 요 약

의성지역 경상누층군에 대하여 유기지화학적 방법과 일라이트 결정도 측정방법을 사용하여 유기물의 열성숙도와 속성 작용정도를 연구하였다. 신동층군의 흑색세일은 0.5-2%의 유기물을 함유하고 있으며, 이 유기물들은 타입 III에 해당하는 고등식물 기원이다. 열분석 Tmax 값은 578~595°C이며, 비트리나이트 반사도는 진주층에서 약 2.9 %Ro, 낙동층에서 약 3~4 %Ro로 유기물의 열적 성숙단계가 건성가스 생성단계에 도달하였음을 보여준다. 비트리나이트 반사도 측정결과에 의하면, 유기물의 열적성숙은 주로 매몰에 의하여 이루어졌으며, 국부적으로 화성암체의 관입에 의하여 이차적인 영향을 받은 것으로 판단된다. 일라이트 결정도값은 층서상의 위치에 따른 규칙적인 변화를 보이지 않으며, 낙동층, 하산동층, 진주층, 일직층 일부에서는 속성정도가 속성작용 영역과 앵키존 영역의 경계부에 해당된다. 이들보다 상위 지층인 일직층, 후평동층, 점곡층, 사곡층의 일라이트 결정도값은 앵키존의 중간부에 위치한다. 층서적으로 보다 상위인 일직층, 후평동층, 점곡층, 사곡층들의 변성도가 높게 나타나는 것은 이 지층이 분포하는 지역에 관입한 화성암체에 의한 열변질에 기인한 것으로 해석된다. 유기물의 열성숙도와 일라이트 결정도에 의한 탄화수소 생성단계는 서로 잘 일치하며, 비트리나이트 반사도와 일라이트 결정도는 모두 관입체의 영향을 지시한다. 연구지역의 속성작용은 전체적으로는 매몰에 의하여 이루어 졌으며, 국부적으로는 관입체에 의한 이차의 영향을 받은 것으로 해석되는 데, 매몰에 의한 고지온은 약 200°C로 추정된다.

**주요어 :** 열적 성숙도, 속성작용, 일라이트 결정도, 비트리나이트 반사도, 경상 누층군, 고지온

**Abstract :** Thermal maturation and diagenesis of the Gyeongsang Supergroup in the Euisong area are studied by means of organic geochemical techniques and illite crystallinity. Black mudrocks of the Singdong Group contain organic matter of 0.5~2.0% derived from higher plants, being compared to type III. Thermal maturity of organic matter reached dry gas generation phase. Tmax by Rock Eval pyrolysis varies between 578°C and 593°C regardless of stratigraphic position and localities, and vitrinite reflectance is about 2.9 and 3~4% Ro in the Jinju and the Nagdong Formations, respectively. Vitrinite reflectance measurements indicate that the maturation is mainly due to burial and partly to be affected by post-depositional intrusions. Illite crystallinity values from the Nagdong, Hasandong, Jinju Formations and part of the Iljig Formation are plotted around the boundary between diagenesis and anchizone, indicating dry gas generation stage. However, the values are not dependent on stratigraphic position. The values from the Iljig, Hupyeongdong, Geomgog, and Sagog Formations fall into the range of anchizone, probably resulted from the post-depositional intrusions which occur locally. Both organic geochemical and illite crystallinity data indicate thermal maturation stage of dry gas generation. Diagenesis of the Gyeongsang strata is mostly controlled by burial, and partly affected by post-depositional intrusions. Paleotemperature of the Singdong Group is estimated at around 200°C on the basis of illite crystallinity.

**Key Words :** thermal maturation, diagenesis, illite crystallinity, vitrinite reflectance, Gyeongsang Supergroup.

#### 서 론

이 연구는 경상북도 의성 및 군위지역에 분포하는 경상누층군의 퇴적암류 지층을 대상으로 경상누층군의 속성작용 정도와 유기물의 열적 성숙도를 결정하고자 하였다. 경상누층군에

대한 연구는 주로 층서학적 및 퇴적학적인 면에서 매우 활발히 이루어져 왔다. 그러나 퇴적층의 속성작용에 대한 연구는 사암을 대상으로한 최근의 일부 연구(노진환과 박현수, 1990)를 제외하고는 거의 이루어지지 않고 있다. 특히 이질암을 대상으로 하여 수행된 속성작용 연구와 유기물을 대상으로하여 수행된 열적 성숙도에 대한 연구는 거의 없는 상태이다. 따라서 이 연구는 이질암을 구성하고 있는 점토광물과 유기물, 그리고

한국자원연구소 석유자원연구부

사암과 이질암에 함유된 탄질물의 속성작용과 열성속도를 연구하여 경상누층군의 고지온을 추정하고자 한다.

속성작용 (diagenesis)은 퇴적물이 퇴적된 이후에 일어나는 모든 물리, 화학적 및 생물학적 변화를 말한다. 그러나 유기 지화학에서 사용하는 속성작용에 대한 정의는 퇴적암석학에서 사용하는 속성작용에 대한 정의와 일치하지 않는다. 즉, 유기 지화학에서는 50°C 미만에서 일어나는 생화학적 변화만을 속성작용으로 정의하며, 매몰온도의 증가에 따른 유기물의 반응과 변화는 카타제네시스 (catagenesis)로 정의한다. 따라서 이 연구에서는 퇴적된 퇴적물이 매몰심도가 깊어져 온도가 상승함에 따라 일어나는 광물상과 암석조직의 변화에 대하여 속성작용이란 용어를 사용하였으며, 매몰심도의 증가와 온도상승의 결과 퇴적물에 함유된 유기물들이 겪는 변화에 대하여는 유기물의 열적진화란 용어를 사용하였다. 그러나 속성작용과 열적진화는 같은 온도에 의하여 동시기에 동일한 지층에서 일어나며 단지 용어의 차이만을 의미한다. 암석의 속성작용 정도는 일라이트/스멕타이트 혼합층광물의 변화, 일라이트 결정도, 암석구성 광물의 조합, 유체포유물, 인회석의 피션트랙 (fission track) 등을 이용하여 결정할 수 있으며, 유기물의 열에 의한 변화 정도인 열적성속도는 유기물의 원소분석, 화분, 포자의 색도 관찰, 추출성 유기물 분석, 비트리나이트 반사도 측정, 열분석 Tmax 등을 통하여 결정할 수 있다 (Gleadow *et al.*, 1983; Heroux *et al.*, 1979; Hoffman and Hower, 1979; Pollastro, 1993; Price, 1983; Tissot and Welte, 1978; Waples, 1980). 이들 중 열성속도 측정에 가장 흔히 사용되는 방법은 Rock Eval 열분석과 비트리나이트 반사도이다 (Espitalié *et al.*, 1977; Vassoevich *et al.* 1969).

광물의 속성작용 정도와 유기물의 열성속도 측정에 의하여 퇴적분지의 지열경력을 밝힐 수 있으며, 지열 경력을 이해하는 것은 탄화수소자원 탐사를 위한 중요한 요소이다. 따라서 이 연구에서는 속성작용 정도와 열성속도 측정에 근거하여 경상누층군에 함유된 유기물의 석유생성 잠재력을 고찰하였다. 또한 이러한 주 목적 이외에 부수적인 목적으로 광물학적인 방법에 의하여 결정된 속성작용 정도 (일라이트 결정도)와 유기지화학적 방법에 의하여 결정된 열적 진화상태 (열적성속도)를 대비하여 두가지 다른 방법의 신빙도를 비교하여 보았다. 매몰온도의 추정 은 석탄 마세탈 중의 비트리나이트 반사도에 의한 것이 일라이트 결정도에 의한 것보다 신뢰도가 높은 것으로 일반적으로 알려져 있으나, 탄질물이 모든 지층에서 산출되지 않는다는 점과 매몰온도 추정을 위하여서는 탄질물을 포함하고 있는 지층이 최대 매몰심도에서 머무른 시간 즉, 매몰과정을 알아야 한다는 어려움이 있다. 반면에 점토광물은 온도 이외의 요인에 의한 영향을 유기물 보다는 쉽게 받는 단점이 있지만 온도에 민감하고, 거의 모든 지층에서 산출된다는 장점 때문에 고지온 추정에 흔히 이용된다 (Guthrie *et al.*, 1986). 경상분지의 매몰과정에 대한 믿을만한 자료가 아직 알려진 것이 없어 이 연구에서는 일라이트 결정도를 사용하여 고지온 추정을 시도하였다.

### 지질 및 시료채취

경상분지 중의 의성 소분지는 선캠브리아기의 변성암류와

쥬라기의 화강암류로 구성된 기반암위에 부정합으로 놓이는 백악기의 퇴적층과 화산암 및 관입체로 구성되어 있다. 백악기의 퇴적층은 주로 역암, 사암, 이질암 및 응회암 등의 쇠설성 퇴적암류로 구성되어 있으며, 하부로부터 신동층군의 낙동층, 하산동층, 진주층과 하양층군의 일직층, 후평동층, 점곡층, 사곡층으로 나누어진다 (Fig. 1). 이들 지층은 육성 퇴적층으로 대체로 남북방향의 주향을 가지며, 북부에 위치한 안동단층과 접하고 있다. 지층들은 판상 또는 암주상으로 관입한 소규모 산성 화산암체들에 의해 국지적으로 열변질을 받았다. 이들 관입체는 분지의 가장자리에 넓게 분포되어 있으며, 일직층, 후평동층, 점곡층 분포지역에도 작은 관입암맥이 곳곳에 산재한다. 유기지화학적 연구를 위해서 낙동층, 하산동층, 진주층, 일직층의 야외 노두에서 탄질물과 흑색 세일을 채취하였으며, 하산동층 하부에서 낙동층 상부를 관통한 시추코아에서도 시료를 채취하였다. 그러나 유기물 함유층이 많은 낙동층과 진주층에 시료 채취가 집중되었으며, 하산동층과 일직층에서는 소수의 시료만이 채취되었다 (Fig. 1). 지표에서는 가능한 변질되지 않은 신선한 시료를 얻기 위하여 주로 최근에 토목공사를 위하여 절개된 노두에서 시료를 채취하였다. 일라이트 결정도 측정을 위한 이질암 시료는 한개의 측선 (북위 약 36° 25')을 중심으로하여 주향에 수직된 방향으로 이동하면서 풍화되지 않은 신선한 노두에서 채취되었다 (Fig. 1). 노두에서 신선한 이암 시료 채취가 어려운 낙동층 시료는 시추코아에서 채취하였다.

### 연구방법

암석의 속성정도과 암석에 포함된 유기물의 열적 성속도를 결정하는 데에는 전술한 바와 같은 다양한 방법이 있으나 이 연구에서는 일라이트 결정도 측정법, 록에발 (Rock-Eval) 열분석법 그리고 비트리나이트 반사도 측정법을 사용하였다. 유기물 분석을 위한 시료들은 1 mm 이하로 파쇄하여 비중 1.6 정도의 브롬화 아연 (ZnBr<sub>2</sub>) 용액을 사용하거나 염산과 불산으로 광물질을 제거함으로써 유기물을 농집하였다. 록에발 열분석기에 의한 열분석은 농집된 유기물을 함유한 암석분말을 불활성 기체하에서 300°C에서 600°C까지 일정한 속도로 승온시켜 인위적으로 탄화수소를 생성시켰으며, 이때 생성된 탄화수소 양 (석유생성 잠재력, S<sub>2</sub>)과 최대 탄화수소 생성온도 (Tmax)를 측정하였다 (Espitalié *et al.*, 1985). 열분석 Tmax와 함께 유기물의 열적 성속도 판단에 사용되는 비트리나이트 반사도 측정은 반사광을 사용하여 탄질물의 연마면에 대하여 이루어졌으며, 탄질물 구성 마세탈의 하나인 비트리나이트 연마면에 입사된 광량에 대한 반사된 광량의 비를 측정하였다. 측정에는 광전증배관 (Photo multiplier)이 장착된 반사현미경인 Leica Photomicrometer MPV Compact II를 사용하였다. 이번 연구에는 편광을 이용하는 최대, 최소 반사도, 비편광을 이용하는 평균반사도와 편광을 이용하는 평균반사도 중에 비편광을 이용하는 평균반사도 (Rmean)를 측정되었다 (ICCP, 1971).

암석의 속성작용 정도를 결정하기 위하여 이질암에서 2 μm 이하의 점토광물을 분리하여 X선 회절분석을 하여 일라이트 결정도를 측정하였다. 일라이트 결정도는 큐블러지수 (Kübler

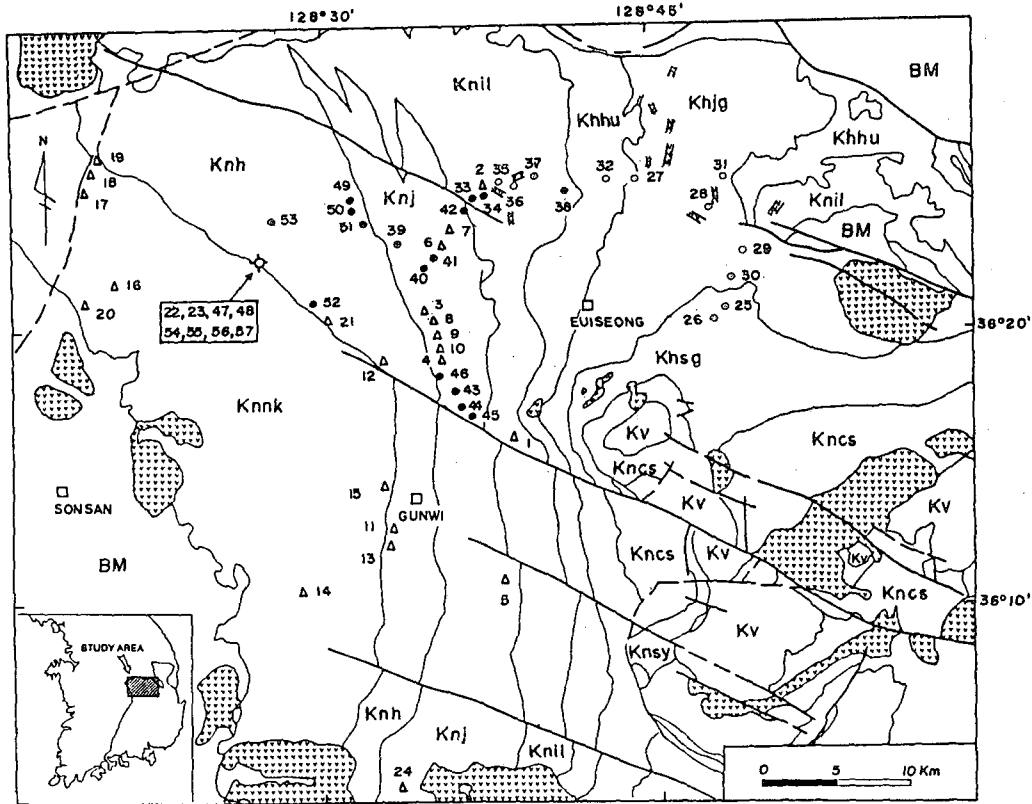


Fig. 1. Geological map and sample locality

BM: Pre-Gyeongsang basement; Knnk: Nagdong Fm.; Knh: Hasandong Fm.; Knj: Jinju Fm.; Knil: Ijig Fm.; Khhu: Hupyeo-  
ngdong Fm. Knjg: Geomgog Fm.; Knsj: Sagog Fm.; Knks: Chunsan Fm.; Knsy: Sinyangdong Fm.; Kv: Yucheon Group; vvv:  
Intrusives; ○: Well location; △: Sample locality for organic geochemistry; ●: Sample locality for illite crystallinity

Index; Kübler, 1966)와 위버지수 (Weaver Index; Weaver, 1960)에 의하여 정량적으로 나타내었다. 퀴블리지수는 10Å 근처에서 나타나는 001피크의 중간 높이에서의 폭을 측정하여 2° 각도의 크기(Δ2θ)로 표시하였다. 위버지수는 10Å에서 측정된 피크의 높이와 10.5Å에서 측정된 피크 높이의 비로 표시하였다. 일라이트는 결정도가 증가할수록 X선 회절도상에서의 001피크는 좁고 높아진다. 따라서 일라이트 결정도가 증가할수록 퀴블리지수(KI)는 적은 값으로 표시되며 위버지수(WI)는 큰 값으로 표시되는 데, 이 값들은 온도, 즉 속성작용 정도의 증가에 따라 거의 일정하게 변화한다. 그러나 일라이트 결정도값은 시료처리 방법과 X선 회절분석기의 조건에 따라서도 결정도값의 차이가 나타날 수 있다 (Kisch, 1987). 이러한 실험조건에 따른 오차를 최소화하기 위하여 시료처리 방법과 X선 회절조건을 제한하는 노력이 여러 연구자들에 의하여 이루어져 왔으며, 이들에 의해 추천된 제한조건은 Kisch (1991)에 의하여 정리되었다. 이 연구에서는 시료 처리와 회절조건에 따른 오차를 최소화하기 위하여 상기의 추천된 조건으로 실험을 하여 일라이트 결정도 값을 얻었다.

### 연구결과 및 토의

#### 유기물의 열적 성숙도

24개 시료중 19개에서 비교적 신빙성이 높은 비트리나이트 반사도 측정치를 얻을 수 있었으며, 이 값들은 대체로 2.7% Ro에서 4.8%Ro 사이에서 변화한다 (Table 1, Fig. 2). 이러한 측정 결과는 유기물의 열적 성숙도가 석탄의 무연탄 단계 또는 탄화수소의 전성가스 생성단계에 도달하였음을 나타낸다 (Stach *et al.*, 1982). 낙동층에서 측정된 비트리나이트 반사도는 시추코아에서 채취된 2개 시료가 4.76%와 4.87%의 값을 가지는 것과 풍화를 심하게 받은 흔적이 야외에서 관찰되는 2개 시료를 제외하면 3.19%와 3.78% 사이에서 변화한다. 진주층에서는 2개 시료 (3.25%, 3.27%)를 제외하면 모두 3% 미만이다. 일직층과 하산동층에서는 반사도 측정 시료 숫자가 각각 3개와 2개로 전체적인 열적 성숙도의 변화를 파악하는데에는 부족하다. 그러나 하산동층의 반사도를 3% 정도로 생각하면 일직층을 제외한 신동층군의 반사도는 층서상 하위로 가면서 반사도가 증가하는 경향을 가지는 것으로 해석할 수 있다. 이것은 신동층군 유기물들의 열적 성숙이 퇴적물의 매몰심도 증가에 따른 온도에 의하여 지배되었다는 것을 나타낸다. 예외적으로 반사도가 높은 몇몇 시료들은 2차적으로 변질을 받은 것으로 해석된다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 연구지역에는 소규모의 관입암체와 관입암맥들이 분포하며, 유기물들은 이들의 관입시 수반된 열의 영향을 받았을 가능성이 있기 때문이다. 실제로 일직층 2번 시료 위치 부근에는 소규모 암맥들이 관입하였으며, 진주층의 24번

Table 1. Vitrinite reflectance data of the Sindong Group in the Euseong area

FORMATION	SAMPLE No.	Ro (%)
ILJIG FORMATION	1	2.32
	2	3.58
JINJU FORMATION	3	2.63
	4	2.88
	5	2.95
	6	3.27
	7	2.98
	8	2.90
	9	2.80
HASANDONG FORMATION	10	2.69
	24	3.25
	11	3.06
HASANDONG FORMATION	12	2.97
	13	2.83
	NAGDONG FORMATION	14
15		2.71
17		3.77
18		3.78
19		3.19
20		3.33
21		3.34
*22		4.87
*23		4.76

\*22,23: core sample at the depth of 1283 m and 1140 m, respectively

시료는 팔공산 화강암체 가까이서 채취된 것이다 (Fig. 1, Table 1). 이러한 가능성은 뒤에서 언급될 일라이트 결정도 측정 결과에 의해서도 뒷받침된다.

열분석 Tmax는 575°C와 593°C의 범위에서 변화하여 유기물의 열적 성숙 단계가 역시 진성가스 생성단계에 도달하였음을 보여준다 (Espitalié *et al.*, 1985; Table 2, Fig. 3). 그러나 반사도의 경우와는 달리 층서상의 위치 즉 매몰심도에 따른 규칙성 있는 변화경향은 인지되지 않는다. 록에발에 의하여 측정할 수 있는 최대 Tmax 온도는 600°C로서, 이 온도 가까이에서는 기체의 특성상 분해능이 감소된다. 분석된 온도는 대부분 이 온도에 근접하기 때문에 이 Tmax 온도에서는 진정한 Tmax 온도로 볼 수 있는 온도의 측정은 불가능하기 때문에 층서상 위치에 따른 변화가 인지되지 않는 것으로 사료된다.

**석유생성잠재력**

과거의 경상분지 암석들에 대한 열분석 경험에 의하면 진암시료를 열분석할 때 거의 모든 경우에 분석치를 얻지 못하거나 분석치를 얻는 경우에도 신빙성이 없음을 알 수 있었다. 이는 광물질에 의한 간섭현상으로 생각된다 (Espitalié *et al.*, 1980). 따라서 이 연구에서는 가능한 한 유기물을 광물질로부터 분리하거나 농집하여 열분석을 하였다.

분석된 시료들의 유기물의 함량은 10~50%의 값을 가지고 석유생성 잠재력을 나타내는 S2값은 0 내지 5.8 mg/gRock의 비교적 높은 값을 보여준다 (Table 2). 그러나 분석된 시료들은 탄질물을 농집한 것이므로 유기물의 함량이나 S2값은 시료가

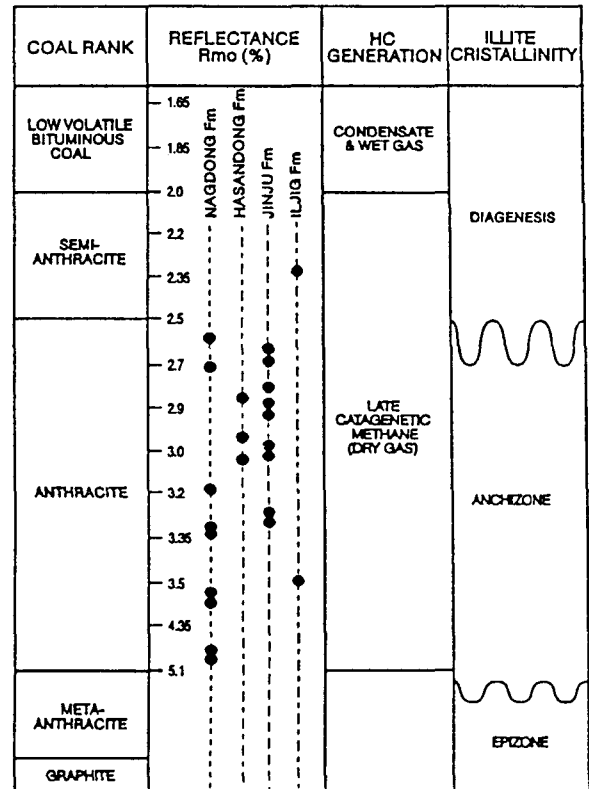


Fig. 2. Thermal maturity of the Sindong Group based on vitrinite reflectance

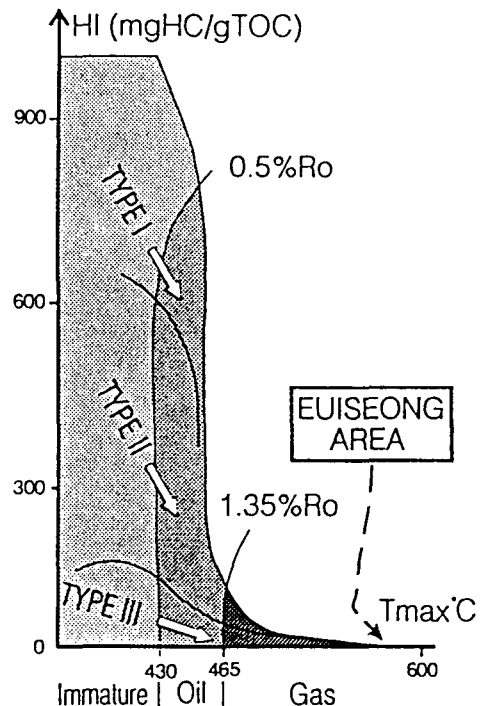


Fig. 3. Thermal maturity of the Sindong Group based on Rock-Eval pyrolysis.

채취된 지역의 석유생성 잠재력을 평가하는 데에는 큰 의미가 없다. 이러한 경우에는 유기물 1 g당 생성된 탄화수소의 양을

**Table 2.** Pyrolysis assay data of the Sindong group in the Euseong area

Formation	Sample No.	Oil	S2	Tmax	GPI	OPI	TPI	TOC	HI
ILJIG FORMATION	1	0.15	0.76	589	0.00	0.17	0.17	48.35	1
JINJU FORMATION	4	0.28	1.40	586	0.00	0.17	0.17	29.63	4
	5	0.14	0.84	590	0.00	0.14	0.14	47.86	1
	6	0.60	1.70	467	0.00	0.26	0.26	15.09	11
	7	0.00	0.19	588	0.00	0.00	0.00	11.69	1
	8	0.10	0.90	590	0.00	0.10	0.10	36.29	2
	9	0.00	0.70	590	0.00	0.00	0.00	12.56	5
	10	0.00	0.70	593	0.00	0.00	0.00	24.70	2
	24	0.46	1.58	455	0.08	0.21	0.29	16.09	9
HASANDONG FORMATION	11	0.13	1.21	592	0.00	0.10	0.10	8.31	14
	12	0.00	0.09	581	0.00	0.00	0.00	50.47	0
	13	0.00	0.90	587	0.00	0.00	0.00	32.64	2
NAGDONG FORMATION	14	0.09	1.65	592	0.00	0.05	0.05	36.71	4
	15	0.40	5.80	575	0.03	0.06	0.09	35.10	16
	16	0.09	0.27	592	0.05	0.24	0.29	5.06	5
	17	0.58	2.42	591	0.06	0.18	0.24	26.53	9
	18	0.47	2.09	591	0.06	0.18	0.24	23.98	8
	19	0.00	0.00	***	***	***	***	32.41	0
	20	0.28	2.31	589	0.00	0.11	0.11	10.18	22
	21	0.15	0.76	587	0.00	0.17	0.17	24.84	3
	*22	0.09	0.09	578	0.00	0.50	0.50	10.81	0
	*23	0.10	0.60	580	0.00	0.14	0.14	33.73	1

\*22, 23: core sample at the depth of 1283 m and 1140 m, respectively

**Table 3.** Illite Crystallinity Values.

Formation	Sample No.	KI	WI	Rock Color
Sagog Fm.	25	0.55	1.98	dark gray
	26	0.34	6.77	dark gray
Geomgog Fm.	27	0.32	4.65	dark gray
	28	0.42	3.77	dark gray
	29	0.30	3.08	dark gray
	30	0.33	4.09	reddish gray
	31	0.33	4.43	black
	32	0.32	4.17	dark gray
Hupyeongdong Fm.	33	0.46	2.60	greenish gray
	34	0.37	3.36	black
	35	0.32	3.48	greenish gray
	35	0.30	3.50	dark red
	36	0.40	2.55	green
	37	0.35	3.39	dark red
	38	0.37	3.51	red
	38	0.37	3.51	red
Jinju Fm.	39	0.42	2.57	dark gray
	40	0.62	1.73	greenish gray
	41	0.40	2.40	dark gray
	42	0.58	2.22	dark gray
	43	0.52	2.29	dark gray
	44	0.52	2.49	dark gray
	45	0.45	2.50	black
	46	0.50	2.26	dark gray
	46	0.50	2.26	dark gray
Hasandong Fm.	47	0.52	2.08	black
	48	0.47	2.58	reddish gray
	49	0.50	1.97	dark gray
	50	0.50	2.58	greenish gray
	51	0.45	2.48	red
	52	0.50	2.06	red
	53	0.45	2.48	red
Nagdong Fm.	54	0.54	2.21	black
	55	0.50	2.19	black
	56	0.54	2.02	black
	57	0.39	2.36	black
	57	0.39	2.36	black

나타내는 수소지수 값이 유기물 또는 암석의 석유 생성 능력에 대한 특성을 더 잘 보여준다. 이 연구에서 분석된 시료들은 0 내지 22 mgHC/gTOC 사이의 수소지수 값을 가지는데, 석유 생성단계에 진입한 석유 근원암의 경우 일반적으로 최소한 200 이상의 값을 가진다는 것을 생각할 때 상기의 수소지수는 극히 낮은 것이다.

낮은 수소지수를 갖는 경우는 대체로 두가지 원인을 생각할 수 있다. 하나는 유기물의 타입에 기인하는 것이고 다른 하나는 유기물의 높은 열적 성숙도에 기인하는 것이다. 고등식물의 목질 또는 섬유질 기원의 유기물인 타입 III에 비교되는 유기물은 조류 또는 플랑크톤 기원의 유기물에 비하여 수소지수가 낮아 일반적으로 200 이하의 값을 가진다.

경상 분지의 퇴적층에 포함된 유기물은 육성 고등식물 기원으로 타입 III에 비교된다는 것은 이미 밝혀진 바 있다 (엄상호 외, 1983). 따라서 연구지역에서 열분석 결과의 수소지수가 낮은 것은 1차적으로 유기물의 타입이 III에 비교되는 점에 기인하고, 2차적으로는 높은 열적 성숙도에 기인하는 것으로 해석된다. 이것은 신동층군의 Tmax가 약 590°C로 매우 높아 건성가스 생성단계에 이르렀음과 Tmax 520°C에서 탄화수소로 변환 가능한 유기물의 90%가 탄화수소로 변환된다고 알려진 것으로부터 짐작할 수 있다 (BEICIP, 1990). 따라서 경상분지 퇴적층에 포함된 탄화수소로 변환 가능한 유기물은 거의 모두 변환되어 잔류 석유생성 잠재력을 나타내는 수소지수가 상기와 같이 낮게 나타나며, 현재 0.5~2%로 함유된 유기탄소 (엄상호 외, 1983)는 석유생성 잠재력이 매우 낮은 유기물로 생각할 수 있게 한다.

상기와 같은 열분석 결과는 현재 신동층군의 잔여 석유생성 잠재력이 극히 낮아 동층군내에서 탄화수소의 근원암을 기대하기는 어려울 것으로 해석된다. 그러나 잔류 유기탄소의 함

량이 상당히 높은 것으로보아 신동층군의 퇴적 당시에는 상당히 많은 양의 유기물이 퇴적되었던 것으로 생각할 수 있다. 또한 현재의 열적 성숙도는 변환가능한 유기물을 대부분 탄화수소로 변환시켰음을 나타낸다. 이런 경우 신동층군이 퇴적되어 현재의 열적 성숙도에 도달하는 동안에 상당히 많은 탄화수소를 생성시켰을 가능성이 있다. 따라서 경상분지 내에서 가스의 저류 조건을 갖춘 곳에서는 건성가스의 부존을 기대할 수도 있을 것으로 생각된다.

**일라이트 속성작용**

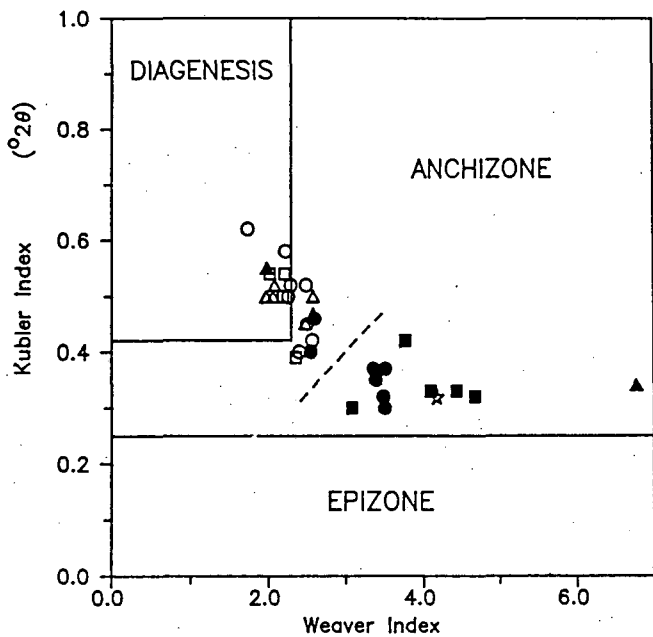
일라이트의 결정화 정도는 암석의 속성정도를 지시하며 이를 정량화하는 대표적인 방법은 퀴블러(1966)와 위버(1960)에 의하여 제안되었다. 퀴블러는 그의 퀴블러 지수(KI)를 사용하여  $KI\ 0.42 \sim \Delta 2\theta$ 에서 속성작용과 앵키존을 구분하였는데 원래 이 경계는 탄화수소 생성단계중 건성가스 생성이 시작되는 곳을 기준으로한 것이다. 또한 에피존의 시작은  $KI\ 0.25$ 이며 이곳은 녹니석류가 나타나기 시작하는 곳이다. 이들 경계는 각각 위버 지수(WI) 2.3 및 12.1에 해당된다 (Fig. 4).

연구지역에서 채취한 총34개 시료를 X선 회절분석에 의하여 퀴블러지수와 위버지수를 측정하였으며 Table 3과 같은 일라이트 결정도 값을 얻었다. 하위 지층인 낙동층, 하산동층, 진주층, 그리고 일직층의 일부 시료(33, 34번 시료)의 KI값은 0.39와 0.62사이에서 변화한다. 이 값들은 지층의 상하에 따른 의미있는 변화는 없으며 대부분은 0.45에서 0.5 사이의 값이 주를 이룬다. 이시료들의 위버지수는 1.7에서 2.6사이에서 변화하며 약 2.4에 집중되어 있다. 한편 일직층의 나머지 시료와

이들보다 상위지층인 후평동층, 점곡층, 사곡층 시료들의 대부분은  $KI\ 0.4$ 이상,  $WI\ 3$  이상의 높은 결정도값을 보여준다. 즉 하위 지층들보다 상위 지층들의 결정도가 높게 나타나는 경향을 보여준다. 이러한 경향은 그림으로 도시하면 더욱 분명히 나타나고, 속성작용 영역과 앵키존 영역 경계부에 집중되어 위치하는 것들과 앵키존에 분포하는 두개의 군집으로 구분됨을 알 수 있다 (Fig. 4).

지층별 일라이트 결정도를 살펴보면 최하위층인 낙동층 시료들은 속성작용과 앵키존의 경계 부근에 집중된다. 그 상위층인 하산동층과 진주층 그리고 일직층의 일부 시료들도 비슷한 곳에 도시된다 (Fig. 4). 그러나 일직층 일부 시료들의 일라이트 결정도는 급격히 높아지는 경향이 관찰된다. 일직층에는 국부적으로 작은 관입암체가 존재하는데 관입암체에 가까운 곳에서 채취한 시료들이 다른 곳에서 채취된 시료들보다 큰 일라이트 결정도 값을 보여준다. 후평동층과 점곡층에서 채취된 시료들은 거의 모두 일직층의 관입암체 부근에서 채취된 시료들과 비슷하거나 더 높은 일라이트 결정도 값을 나타낸다. 사곡층의 2개 시료중 1개는 풍화가 심하여 속성작용영역에 도시되지만 다른 1개 시료는 가장 높은 값을 나타낸다. 후평동층, 점곡층, 사곡층에도 많은 맥암류들이 존재하며 비교적 큰 관입암체도 존재한다 (Fig. 1). 일라이트 결정도는 온도에 가장 민감하게 변화한다. 온도 이외에도 원암의 암상적인 조건은 일라이트 결정도에 영향을 줄 수 있다. 그러나 이 연구에서 사용된 시료는 셰립의 실트스톤 내지는 셰일로서 거의 동일한 암상이다. 셰립의 이질암에서의 공극수의 이동은 매우 제한적이다. 또한 분석된 시료들의 광물조성은 거의 비슷하다. 한편 일라이트 결정도값이 높게 나타나는 시료의 채취위치는 관입체와 가깝다. 이런 점들을 고려할 때 연구지역의 일라이트 결정도 변화는 원암의 화학적조건의 영향보다는 온도의 영향이 큰 것으로 생각된다. 이러한 사실은 일라이트 결정도가 높은 군집의 시료는 매몰에 의한 속성작용 외에 관입암체의 영향을 크게 받은 것으로 해석할 수 있게 한다. 한편 낙동층, 하산동층 및 진주층의 결정도가 낮은 시료들은 관입암체의 영향을 받지 않았거나 만났더라도 상위의 지층들보다는 미미한 영향을 받은 것으로 해석할 수 있다.

분석된 일라이트 결정도 가운데 관입체의 영향을 받지 않았거나 관입체의 영향이 적었을 것으로 생각되는 지층들의 일라이트 결정도값은 대부분 속성작용과 앵키존의 경계부에 집중되어 있다 (Fig. 4). 이 경계부는 비트리나이트 반사도 2.6~2.8%Ro에 대비될 수 있다(Kübler *et al.*, 1979). 유기물의 열적 성숙도 (주로 비트리나이트 반사도)와 일라이트 결정도를 대비하려는 시도가 많은 연구자들에 의하여 이루어졌다 (Guthrie *et al.*, 1986; Heroux *et al.*, 1979; Kisch, 1987). 연구된 지역에 따라 조금씩 차이가 있으나 일라이트 결정도에 있어서 앵키존이 시작되는 곳과 석탄의 진화단계중 무연탄 단계가 시작되는 곳, 그리고 탄화수소 생성단계중 건성가스 생성단계가 시작되는 곳은 거의 일치한다 (Fig. 2). 이 연구에서도 유기 지화학적 파라메타들이 신동층군의 유기물들이 건성 가스 생성 단계에 이르렀음을 말해주고 있는데, 이는 일라이트 결정도에 의한 속성작용 정도와 잘 일치하고 있으며, 위에 언급한 연구자들에 의한 연구 결과와도 부합된다.



**Fig. 4.** Distribution of illite crystallinity values based on Kübler and Weaver Index.  
 □:Nagdong Fm. △:Hasandong Fm. ○:Jinju Fm. ●:Iljig Fm. ☆:Hupyeongdong Fm. ■:Geomgog Fm. ▲:Sagog Fm.

비트리나이트 반사도 측정값이 층서상 하위로 가면서 증가하는 경향이 인지되는 점으로 보아 본 연구지역의 열성숙은 일차적으로 매몰온도 증가에 의하여 지배된 것으로 생각된다. 매몰온도는 비트리나이트 반사도에 의하여 추정할 수 있다. 그러나 정확한 매몰온도 추정을 위하여서는 유기물의 매몰역사가 밝혀져야만 가능하다. 본지역의 경우 유기물의 매몰역사가 정확히 밝혀져 있지 않기 때문에 유기물에 의한 매몰온도 추정은 어렵다. 따라서 일라이트 결정도에 의한 속성작용 단계로부터 이러한 온도를 추정할 수 밖에 없다. 일라이트 결정도에 의한 지층의 매몰온도를 알아내는 연구가 많이 시도되었으나 연구된 지역마다 차이가 존재하기 때문에, 뚜렷하게 온도를 규정할 수는 없다. 그러나 속성작용 단계가 끝나고 앵키존 단계가 시작되는 온도는 일반적으로 200°C 내외인 것으로 인정되고 있다 (Dunoyer de Segonzac, 1970). 따라서 앵키존 시작단계의 온도인 200°C를 낙동층, 하산동층, 진주층, 일직층 등 관입암의 영향을 받지 않은 지층들에 적용할 수 있는 것으로 생각된다. 한편 일직층, 후평동층, 점곡층, 사곡층 등 관입암의 영향을 받은 것으로 보이는 지층들은 이보다 높은 온도를 경험하였을 것으로 사료된다.

## 결 론

이 연구지역의 지층에 함유된 유기물은 타이프 III에 비교되는 고등식물 기원으로 전성가스 생성단계의 열적 성숙도를 보여준다. 유기물의 열적 성숙은 주로 매몰에 의한 것이며, 국부적으로 관입암체에 의한 이차적인 영향을 받은 것으로 해석된다. 현재의 잔류 석유생성 잠재력은 극히 낮아 탄화수소 근원암의 발달을 기대하기는 어려우나 잔류 유기물의 함량이 비교적 높은 점으로부터 탄화수소(전성 가스)의 존재 가능성을 완전히 배제하기는 어려운 것으로 생각된다.

일라이트 결정도는 층서상의 위치에 따른 뚜렷한 변화를 보이지 않으며, 속성작용 영역과 앵키존 영역의 경계부에 집중되는 것과 앵키존 영역의 중간부에 분포하는 2개 군집으로 구분되며, 후자는 관입암체의 영향을 받은 것으로 생각된다. 속성작용의 정도와 매몰 온도에 관한 많은 연구 결과, 200°C가 앵키존의 시작온도로 일반적으로 받아들여지고있는 점을 고려할 때 신동층군의 매몰온도는 약 200°C로 추정되나 보다 신빙성 있는 고지온 추정을 위해서는 매몰역사에 대한 연구가 필요하며, 다른 방법에 의한 보완적인 고지온 연구가 요구된다.

## 사 사

이 논문은 1993년도 한국자원연구소에서 수행한 상공자원부 출연연구과제 (KR-93-4A-1)의 일부이다. 시료의 채취와 분석에 도움을 주신 한국자원연구소 석유자원 연구그룹의 여러분들께 감사를 드립니다. 또한 이 논문에 대하여 좋은 충고와 제언을 하여주신 강원대학교 노진환 교수께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 노진환, 박현수, 1990, 고령지역 경상누층군 사암의 속성작용 및 속성광물, 지질학회지, 26, 371-392.
- 엄상호, 최현일, 손진담, 오재호, 광영훈, 신성천, 윤현수, 1983, 경상분지의 경상누층군에 대한 지질 및 지화학적 연구, 한국동력자원연구소, 연구특보, KIER Bulletin-36, 124p
- BEICIP, 1990, MATOIL: A quantitative model of hydrocarbon generation for the personal computer.
- Dunoyer de Segonzac, G., 1970, The transformation of clay minerals during diagenesis and low grade metamorphism. *Sedimentology*, 15, 282-344.
- Espitalié, J., Laporte, J.L., Madec, M. Marquis, F., Leplat, P. Paulet, J. and Boutefeu, A., 1977, Méthode rapide de caractérisation des roches meres, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 32, 23-42.
- Espitalié, J., Madec, M., Tissot, B., 1980, Role of mineral matrix in Kerogen pyrolysis: Influence on petroleum generation and migration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 64, 59-66.
- Espitalié, J. Deroo, G. et Marquis, F., 1985, La pyrolyse Rock Eval et ses applications. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 40, 5, 563-784.
- Gleadow, A.J.W., Duddy, I.R. and Lovering, J.F., 1983, Fission track analysis: A new tool for the evaluation of thermal histories and hydrocarbon potential. *Journal of Australian Petroleum Exploration Association*, 23, 93-102.
- Guthrie, J.M., Houseknecht, D.W., and Johns, W.D., 1986, Relationships among vitrinite reflectance, illite crystallinity, and organic geochemistry in Carbonaceous Strata, Ouachita Mountains, Oklahoma and Arkansas. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 70, 26-33.
- Heroux, Y., Chagnon, A., and Bertrant R., 1979, Compilation and correlation of major thermal maturation indicators. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63, 2128-2144.
- Hoffman, J. and Hower, J., 1979, Clay mineral assemblages as low grade metamorphic geothermometers: Application to the thrust faulted disturbed belt of Montana, U.S.A. *Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication No. 26*, 55-79.
- ICCP, 1971, International handbook of coal petrology.
- Kisch, H.J., 1987, Correlation between indicators of very low-metamorphism. In: M. Frey (Editor), *Low Temperature Metamorphism*. Blackie, Glasgow, 227-304.
- Kisch, H.J., 1991, Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction settings, and interlaboratory samples. *Journal of Metamorphic Geology*, 9, 665-670.
- Kübler, B., 1966, La cristallinité de l'illite et les zones tout a fait supérieures du métamorphisme. In: J. P. Schaer (Editor), *Colloque sur les Etages Tectoniques*, Neuchatel, 105-122.
- Kübler, B., Pittion, J.-L., Heroux, Y., Charollais, J. and Weidmann, M., 1979, Sur le pouvoir reflecteur de la vitrinite dans quelques roches du Jura, de la Molasse et des Nappes préalpines, helvétiques et penniques., *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 72, 347-373.
- Pollastro, R.M., 1993, Consideration and applications of the illite/smectite geothermometer in hydrocarbon-bearing rocks of Miocene to Mississippian age., *Clays and Clay Minerals*, 41, 119-133.

- Price, L.C., 1983, Geologic time as a parameter in organic metamorphism and vitrinite reflectance as an absolute paleothermometer. *Journal of Petroleum Geology*, 6, 5-38.
- Stach, E., Mackowsky, M.-Th., Teichmuller, M., Taylor, G.H., Chandra, D., and Teichmuller, R., 1982, Stach's textbook of coal petrology. Gebruder Borntraeger, Berlin, 535p.
- Tissot, B.P. and Welte, D.H., 1978, Petroleum formation and occurrence. New York, Springer Verlag, 538p.
- Vassoevich, N.B., Korchagina, Yu., Lopatin, N.V., Chernyshev, V. V., 1969, Principal phase of oil formation. *Vestnik Moskovskogo Universiteta*, 6, 3-27.
- Waples, D.W., 1980. Organic geochemistry for exploration geologists. Minneapolis, Minnesota, Burgess Publishing, 151p.
- Weaver, C.E., 1960, Possible uses of clay minerals in search for oil. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 44, 1505-1518.

---

1994년 10월 20일 원고접수