

<Short Note>

경상분지 백악기 진주층에서 발견된 방해석 비프에 대한 예비연구

하수진¹ · 채용운¹ · 정기영² · 손 문¹ · 양경희¹ · 백인성³ · 임현수^{1,*}

¹부산대학교 지질환경과학과

²안동대학교 지구환경과학과

³부경대학교 지구환경과학과

요 약

비프는 층리와 평행한 섬유상의 광맥을 지칭하는데, 비프를 구성하는 섬유상의 결정들은 층리에 거의 수직으로 성장하는 경향을 보인다. 비프는 주로 퇴적분지의 유기물이 풍부한 흑색 셰일에서 나타난다. 비프는 방해석, 석고, 석영과 같은 흰색의 맥석 광물로 구성될 수 있지만 가장 흔한 광물은 방해석이다. 전 세계 산출지를 살펴보면 방해석 비프는 주로 대서양 연안에 집중되어 나타나지만, 호주와 뉴질랜드를 제외하면 태평양 서쪽 연안에서는 거의 보고된 바 없다. 최근 한국에서는 최초로 경상분지 백악기 진주층에서 방해석 비프가 발견되었다. 연구지역에서 방해석 비프는 호수기원의 유기물이 풍부한 흑색 셰일 내에서 발견되었다. 비프의 두께는 수 mm에서 최대 3 cm에 달하며, 길이는 수 cm에서 수십 m에 달한다. 비프의 층간 간격은 수 cm에서 약 1 m 정도이다. 일부는 단층면을 따라서 혹은 변형된 층 내에서 발달하지만, 대부분은 층리와 평행하게 나타난다. 두껍게 발달한 비프의 경우 광맥의 중앙부에 세립의 방해석 결정, 유체포유물, 모암의 파편 등으로 구성된 암회색에서 흑색의 중앙선을 보인다. 비프는 섬유상 방해석 결정의 성장 방향에 따라 직선형과 S자형으로 구분된다. 섬유상의 방해석 결정들은 중앙선에서 상하부의 모암 방향으로 대칭적으로 성장한 것으로 보인다. 현미경관찰에 의하면 연구지역 방해석 비프는 이향광맥으로 해석된다. 층리와 평행한 균열의 형성기작과 비프의 형성온도 등에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

주요어: 비프, 방해석 광맥, 진주층, 경상분지, 백악기

Sujin Ha, Yong-Un Chae, Gi Young Jeong, Moon Son, Kyounghee Yang, In Sung Paik and Hyoun Soo Lim, 2015, A preliminary study of calcite beef found in the Cretaceous Jinju Formation, Gyeongsang Basin, Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 6, p. 597-604

ABSTRACT: The term “beef” refers to fibrous minerals in bedding-parallel veins, where the fibers form approximately perpendicular to the bedding planes. It mostly appears within organic-rich black shale layers in sedimentary basin. Although the veins can consist of white gangue minerals, such as calcite, gypsum, or quartz, the commonest mineral in the fibers is calcite. According to the worldwide localities of calcite beef, they concentrated in some areas, especially around the Atlantic Ocean. However, they have been rarely reported in the western Pacific margin, except Australia and New Zealand. Recently, calcite beefs have been found in the Cretaceous Jinju Formation, Gyeongsang Basin, Korea. As far as we know, this is the first report of calcite beef in Korea. In the study area, calcite beefs were commonly found in the organic-rich lacustrine black shale layers. The vein thickness is anywhere between a few millimeters to maximum 3 centimeters, and their length ranges from a few centimeters to several tens of meters. The interval between successive veins is from a few centimeters to about 1 meter. Most of them occur parallel to the bedding planes, although some of them are developed along fault planes or within deformed layers. In case of relatively thick beefs, the center of veins often shows a dark grey to black central median line, defined by fine-grained calcite grains, fluid inclusion lines, or wall rock particles. Based on the orientation of fibrous calcite, they can be divided into two types: straight and sigmoidal types. The fibrous calcites are thought to have been symmetrically grown from the median lines to top and bottom of wall rock. Based on the microscopic observation, the calcite beef in the study area is interpreted to be antitaxial. The formative

* Corresponding author: +82-51-510-2251, E-mail: tracker@pusan.ac.kr

mechanism of horizontal fractures and the formation temperature of beefs remain as a matter to be studied further.

Key words: beef, calcite vein, Jinju Formation, Gyeongsang Basin, Cretaceous

(*Sujin Ha, Yong-Un Chae, Moon Son, Kyounghee Yang and Hyoun Soo Lim, Department of Geological Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Gi Young Jeong, Department of Earth Environmental Science, Andong National University, Andong 36729, Republic of Korea; In Sung Paik, Department of Earth Environmental Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea*)

1. 서 언

광맥(vein)은 단열을 따라 흐르는 유체로부터 침전된 광물결정들이 판상의 형태를 이루는 것으로 모암과의 조성이나 색상 차이에 의해 야외에서 쉽게 인지된다. 광맥은 형성 당시 관여했던 유체의 화학 조성이나 기원, 형성 온도, 압력, 모암변형의 역학적 특성에 대한 중요한 정보를 제공하기 때문에 매우 유용한 구조이다(Bons *et al.*, 2012 and references therein). 비프(beef)는 광맥 중에서 층리와 평행한 섬유상의 광맥(bedding-parallel fibrous vein)을 지칭하며, 비프를 구성하는 섬유상 결정들의 성장 방향은 층리에 수직인 경향을 보인다. 섬유상 결정 이란 길이/폭 비(>10)가 높게 나타나며 결정의 성장 방향을 따라 폭의 증가가 거의 없어야 한다(Fisher and Brantley, 1992; Bons and Jessell, 1997; Elburg *et al.*, 2002). 비프는 본래 광부들이 사용했던 용어로 섬유상의 광물이 스테이크의 근육과 유사하기 때문에 비프라고 불리었고, 문헌상에는 19세기 중반부터 보고되었다(Sorby, 1860). 비프는 주로 방해석이나 석고, 석영과 같은 흰색의 맥석 광물(white gangue mineral)들로 구성되지만, 부수적으로 소량의 금이나 에머랄드, 황화물, 역청 우라늄광(pitchblende), 비투멘(bitumen) 등을 포함하기도 한다.

비프는 퇴적분지 내의 물리적, 화학적 변화를 반영하기 때문에 기존 연구에서는 전세계의 다양한 퇴적분지에서 발견되는 비프를 기재하고, 섬유상 광물의 성장패턴, 유체 및 고체포유물의 특성, 동위원소분석이나 재현실험 등을 이용하여 비프의 형성조건과 형성기작을 밝히고자 하는 연구가 주로 이루어졌다(Taber, 1918; Durney and Ramsay, 1973; Ramsay, 1980; Means and Li, 2001; Wiltschko and Morse, 2001; Elburg *et al.*, 2002; Cobbold and Rodrigues, 2007; Rodrigues *et al.*, 2009). 또한 비프는 주로 유기물이 풍부한 흑색 셰일층에서 관찰되고 원유의 생성 및

이동과 연관되어 있기 때문에 점차 관심이 높아지고 있으며, 최근에는 비프를 이용한 석유시스템(petroleum system) 연구가 다수 보고되고 있다(Stoneley, 1983; Zanella and Cobbold, 2012; Cobbold *et al.*, 2013; Nomura *et al.*, 2014; Zanella *et al.*, 2014). 지금까지 방해석 비프는 남극을 포함한 전세계 110여 곳에서 발견되었지만 동북아시아의 경우 중국 이외에서는 보고된 바 없다(Cobbold *et al.*, 2013). 이 연구에서는 국내 최초로 백악기 경상누층군 진주층에서 발견된 방해석 비프의 산상에 대해 기술하고 그 중요성에 대해 논의하고자 한다.

2. 연구지역

방해석 비프는 경상남도 진주시 호탄동의 남해고속도로 진주휴게소 사면노두와 사천시 서포면 비토리 해안가 노두에서 발견되었다. 이 지역의 퇴적암층은 경상누층군의 최하부 층군인 신동층군의 진주층 상부에 해당한다. 진주층은 백악기 경상분지에 발달한 대표적인 호수퇴적층으로(Choi, 1986) 신동층군의 최상부 지층이다. 진주층은 회색 역질 사암, 회색 내지 암회색 조립사암과 미사암, 흑색 셰일 및 이암이며 화산기원 퇴적물을 함유하는 사암과 응회질 사암이 부분적으로 협재하고, 상부는 사암보다 흑색 셰일이 우세하게 발달한다(Choi, 1986). 진주층의 퇴적시기는 과거 연체동물 화석(Kobayashi and Suzuki, 1936)과 화분(Choi, 1985; Choi and Park, 1987; Yi *et al.*, 1993, 1994) 연구를 통해 대략 초기 백악기에 해당하는 것으로 알려져 왔으나, 최근 쇠철성 저어콘을 이용한 U-Pb 절대연대 측정을 통해 엘비안(Albian)에 대비되는 것으로 보고되었다(Lee, T.-H. *et al.*, 2010; Lee, Y.I. *et al.*, 2010).

이번 연구에서는 방해석 비프가 발견된 진주와 사천 지역 중에서 비프의 발달정도가 우세한 진주지역을 중심으로 조사하였다(그림 1). 진주휴게소의 사면

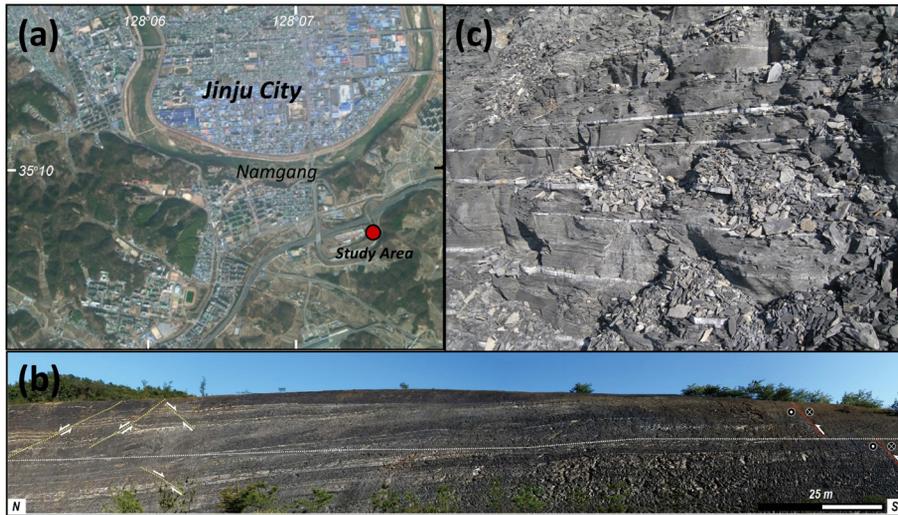


Fig. 1. (a) Location map of the study area. (b) Outcrop photograph showing the major fault lines. (c) At outcrop, calcite beef veins (white color) are parallel to the bedding in the Jinju Formation.

노두(35°09'36.25"N, 128°07'27.18"E)는 약 30 m 높이에 너비는 200 m에 달하는 대규모 노두이다(그림 1b). 연구지역인 진주층의 일반적인 주향은 N25~30°E, 경사는 10~20°SE이며 비교적 두께가 일정하고 연속성이 좋은 세일층과 사암층이 교호하면서 발달되어 있다. 노두 하부에는 주로 세립 및 중립 사암이 분포하고 상부에는 흑색 세일이 우세하며 층간에 이회암이 협재한다(그림 1c, 2). 연구지역 하부 노두에서는 석회질 단괴와 스트로마톨라이트가 다수 산출된다. 사면노두는 남북방향으로 분포하며 북쪽에는 정단층계가 발달하고 남쪽에는 주향이동단층이 관찰된다(그림 1b).

3. 산 상

연구지역의 퇴적암은 석영질 잡사암, 응회질 장석 잡사암, 암편질 사암, 이회암, 흑색 세일의 5개 암상으로 구분된다. 노두에서 발견되는 섬유상의 암맥은 연구지역 퇴적층 상부에 존재하는 거의 모든 흑색 세일에서 관찰되었다(그림 3). 암맥의 두께는 수 mm에서 최대 약 3 cm에 달하며(그림 1c, 2) 길이는 짧게는 수십 cm ~ 길게는 수십 m 까지도 확인되었다. 보통 비프의 밀도는 미터 당 수매 정도이지만, 비프가 우세한 구간에서는 미터당 수십매 이상 집중되기도 한다(그림 1c, 3a, 3b). 섬유상의 광맥들은 대부분 층리와 평행하게 발달하지만, 간혹 단층면을 따

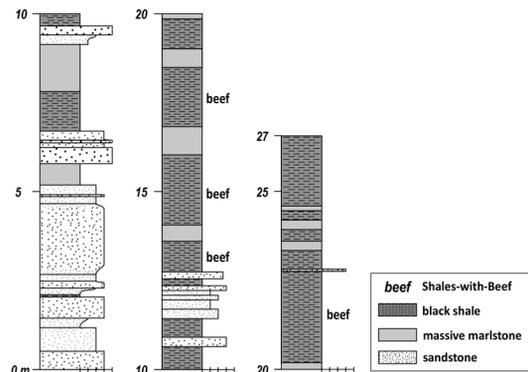


Fig. 2. Stratigraphic section of the Jinju Formation at the study area. m: mud, ms: medium sand.

라 발달하여 층을 절단하거나 심하게 변형되어 교란된 층에서도 나타난다(그림 3b).

또한 상대적으로 두껍게 발달한 비프 내에서는 진회색 또는 흑색의 중앙선(median lines)을 육안으로 확인할 수 있고(그림 3c, 3d), 흑색의 고체 포유물들이 비프 내에서 흔히 관찰된다(그림 3c, 3d). X-선 회절분석 결과는 연구지역의 섬유상 광물을 포함하는 맥이 방해석으로 이루어져 있음을 보여 준다. 현미경을 이용한 박편관찰을 통해 중앙선과 고체 포유물을 더 자세히 관찰할 수 있는데, 중앙선은 비교적 어둡게 나타나며 비프의 중심부에 위치한다. 대부분의 중앙선은 광맥의 방향과 평행하며 연속적으로 보

이지만 몇몇은 특징적으로 변형에 의해 절단되었다(그림 4a, 4b). 흰색의 섬유상 방해석 결정들은 대체로 층리에 수직에 가까운 방향으로 성장하는 패턴을 보이며, 중앙선을 기준으로 상하부의 형태가 대칭적인 특징을 보인다(그림 4). 섬유상 방해석 결정들의 발달 형태는 크게 직선형과 S자형의 2가지 형태로 나타난다. 직선형은 다시 층리에 비교적 수직한 것과 경사진 것으로 나뉘고, 각각 다른 섬유상 성장 형

태들이 단일 비프에 공존하기도 한다(그림 4). 모암인 흑색 셰일의 파편으로 이루어진 고체 포유물들은 섬유상 방해석의 성장을 끊으며 사이사이에 포함되어 있다. 고체 포유물들은 층리와 평행한 방향으로 길게 선상으로 배열되어 있거나, 방해석 결정들의 성장에 따라 작은 조각으로 분리된 포유물들이 사선 방향으로 배열되는 포유물 밴드(inclusion band)의 형태를 보인다(그림 4a, 4b).

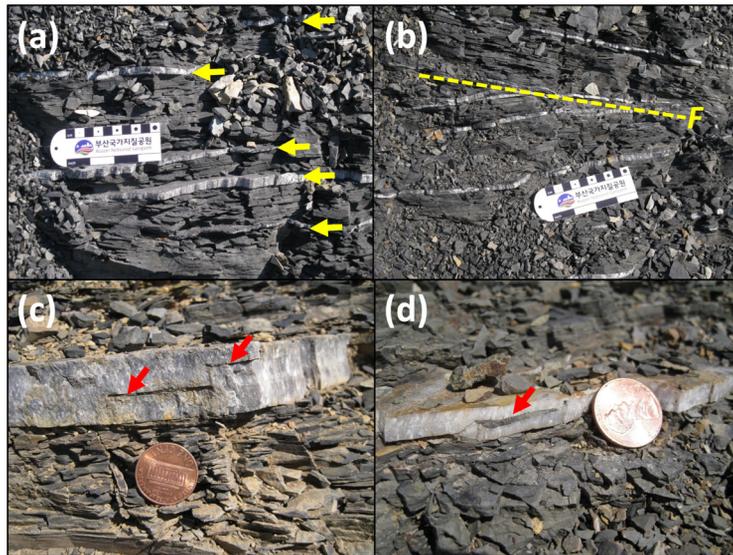


Fig. 3. (a) Five layers of calcite beef (arrows) within black shale, the Jinju Formation. Note the different thickness of each calcite beef. (b) Upper shale beds above the fault are gently inclined, but calcite beef layers within the upper beds are still bedding-parallel. (c and d) Close-up view of calcite beef in study area. Note the solid inclusions (host shale fragments) within beef.

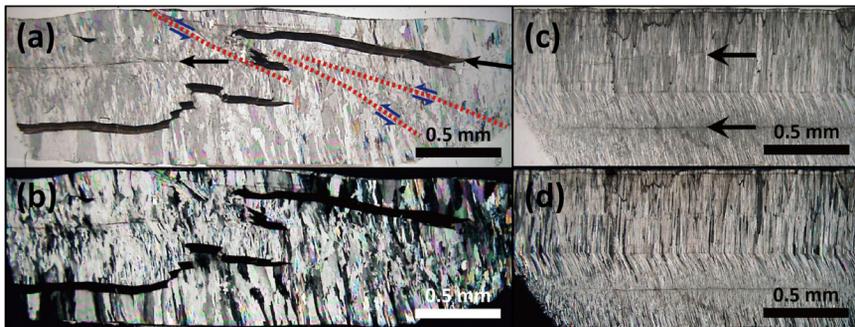


Fig. 4. Thin-section photographs of calcite beef. (a and b) Solid inclusions (shale fragments) arrangements within a single beef, showing the evidence for shortening. (c and d) Microstructures of fibrous calcite veins, showing the multi-stage growth pattern. Calcite fibers are perpendicular to the bedding in the upper part, but oblique in the lower part. Two median lines (arrows) can be observed in the upper and lower part. a and c: plane-polarized light; b and d: cross-polarized light.

4. 토의 및 결론

방해석 비프의 형성 기작에 대한 일반적인 이론은 내부적 혹은 외부적 요인으로 만들어진 층리와 평행한 균열을 유체의 화학적 반응이나 온도·압력의 감소와 같은 물리적 조건의 변화에 의해 과포화된 유체가 침전되면서 섬유상의 방해석 광물이 광맥의 형태로 채운다는 것이다(Cobbold *et al.*, 2013). 균열을 채우는 유체의 공급방법은 크게 2가지 기작이 가능하다. 이류에 의한 유체 흐름(advective fluid flow)이 균열이나 공극을 통해 비교적 먼 거리를 이동하는 경우와 입자간(intergranular)에 존재하는 정적인 유체에서 온도, 압력 또는 화학적인 구배에 의한 확산(diffusion)을 통해 짧은 거리(수 cm ~ 수십 cm)를 이동하는 경우이다. 전자와 후자는 각각 열린계와 닫힌계에서 효율적인 것으로 알려져 있다(Durney and Ramsay, 1973; McCaig *et al.*, 1995; Oliver and Bons, 2001). 연구지역의 경우 내부에 석회질 성분을 포함하는 이회암이 어느 정도 포함되어 있지만, 흑색셰일이 수십 미터 두께로 발달하고 있고 방해석 비프의 밀도가 매우 높다는 점을 고려하면 석회질 성분을 다량 포함하고 있는 하부의 하산동층처럼 먼 곳으로부터 이동된 유체에 의해 영향을 받았을 가능성이 높을 것으로 판단된다.

일반적으로 광맥은 이를 채우는 결정의 형태와 성장 방향에 따라서 크게 신장된 광맥(stretched or ataxial veins)과 동향광맥(syntaxial veins), 이향광맥(antitaxial veins) 등으로 구분할 수 있다(Durney and Ramsay, 1973; Hilgers and Urai, 2002). 연구지역의 방해석 비프의 경우 내부구조로 판단할 때 신장된 광맥은 배제할 수 있고, 동향광맥이나 이향광맥의 형태를 보이는 것으로 생각된다. 동향광맥의 경우 하나의 성장면(growth plane)을 가지며 벽면으로부터 안쪽으로 성장하는데 양쪽 벽에서 성장하는 대칭형과 한쪽 벽에서 성장하는 비대칭형으로 나뉜다. 반면 이향광맥의 경우 안쪽(중앙선)에서 바깥쪽으로 성장하기 때문에 두 개의 성장면을 가지고 있다. 고체 포유물은 방해석 비프가 성장할 때에 모암에서 떨어져 나온 것으로서 섬유상 결정들이 비프 내부에서 외부로 성장했다는 증거가 된다. 연구지역에서 발견되는 방해석 비프는 고체 포유물을 포함하는 내부구조로 볼 때 전형적인 이향광맥의 특징을

보인다(그림 3c, 3d, 4a, 4b).

방해석 비프가 이향광맥에 해당하고 이들의 성장 패턴이 직선형과 S자형의 두 가지 형태를 모두 보이는 특징을 통해(그림 4c, 4d) 연구지역 방해석 비프의 형성 과정 동안 응력의 변화를 추정할 수 있다. 처음에 층리와 수직 또는 준수직한 방향으로 발생한 인장력으로 변위가 만들어지고 유체가 주입되어 광물이 섬유상으로 침전되었을 것이고, 이후 바뀐 응력 방향을 따라 섬유상의 방해석 결정들이 사선으로 발달하는 2단계 혹은 그 이상의 과정을 거쳤을 것으로 예상된다. 실제로 연구지역 방해석 비프의 경우 2단계 이상의 광맥이 혼합된 복합 광맥(composite vein)의 형태가 흔히 관찰되는 특징을 보인다(그림 4c, 4d). 또한 인접한 광맥들의 결정 성장 방향이 서로 다른 방향을 보이며, 기존의 비프가 이후에 성장한 비프에 의해 교란되거나 절단된 관계가 관찰되는 것으로 보아 연구지역 비프의 형성 과정은 매우 복잡하고 상당 기간 동안 지속되었을 것으로 추정된다.

방해석 비프의 형성을 가능하게 하는 층리와 평행한 방향의 균열이 생성되는 기작은 아직까지도 명확히 규명되지 않았지만, 크게 내부적 요인과 외부적 요인으로 구분할 수 있다. 내부적 요인으로는 결정 성장에 의해 발생하는 결정화 응력이 있고 외부적 요인으로는 광역적 또는 국지적으로 나타나는 지구조적인 응력과 공극유체의 과압력(overpressure)이 있다. 결정화 응력에 대해서는 Keulen *et al.* (2001)이 무수석고의 수화에 대한 실험을 수행하였지만 섬유상 광맥의 재현에는 성공하지 못했다. 이론적으로 층리가 수평이 아니거나 암석이 이방성일 경우를 제외하면 정상적인 정암압(lithostatic pressure) 조건 하에서는 층리와 평행한 방향의 균열이 발생할 수 없기 때문에, 가장 일반적으로 통용되는 기작은 유체의 압력이 정수압(hydrostatic pressure)보다 높아지는 과압력 조건이다. 과압력의 원인은 확실하게 밝혀지지 않았지만 물리적, 화학적 다짐작용과 탄소수소의 생성, 함수광물들의 탈수화작용 등에 의해 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다(Swarbrick *et al.*, 2002; Cobbold and Rodrigues, 2007). 유체의 과압력은 일반적으로 퇴적분지에서 매우 흔하게 관찰되며, 특히 심부에서 쉽게 발생한다(Swarbrick *et al.*, 2002). 반면 조구조적 응력이 작용할 경우 과압력 조건 없이도 층리와 평행한 균열이 형성될 수 있

는 것으로 알려져 있다. 유기물 함량이 높은 진주층의 특성상 탄화수소의 생성과 관련된 과압력이 층리와 평행한 균열을 형성시킨 원인일 가능성이 높다. 하지만 연구지역의 경우 노두 규모에서 단층과 습곡 등 조구조적 응력에 의한 구조들이 발달하고 있고(그림 1b, 3b), 방해석 비프 내에서도 역단층이 발견되며(그림 4), 단층면을 따라서 발달한 방해석 광맥이 관찰되기 때문에 비프의 형성과정 동안 조구조적 응력의 영향을 받았음은 분명해 보인다. 따라서 연구지역에서 형성된 층리와 평행한 균열은 시기적으로 우세한 정도의 차이는 있을 수 있지만 과압력과 조구조적 응력 모두에 의해 영향을 받은 것으로 해석된다.

연구지역에서 발견되는 방해석 비프의 형성 시기는 선행연구 결과를 이용하여 대략적으로 추정할 수 있다. 신동층군의 경우 비트리나이트 반사도(Son *et al.*, 1994; Oh *et al.*, 1996; Cheong *et al.*, 1997)와 핵분열 비적(Lim *et al.*, 2003) 연구에 의하면 약 80 Ma 시기에 260°C 정도의 최대 온도를 겪은 것으로 알려져 있다. 일반적인 방해석 비프의 형성 온도가 70~120°C

(Cobbold *et al.*, 2013)인 점을 고려하면, 진주층에서 발견되는 방해석 비프의 형성 시기는 진주층 퇴적 이후 매몰 깊이가 약 2~3 km에 도달했던 초기에 형성되었을 가능성이 높은 것으로 보인다. 하지만 직접적인 형성 온도 규명을 위해서는 방해석 비프에 포함되어 있는 유체포유물에 대한 추가 연구가 필요하다.

현재까지 취합된 자료(Cobbold *et al.*, 2013)에 의하면 방해석 비프는 대서양 주변 지역에 집중되어 있으며(그림 5a), 방해석 비프가 우세하게 나타나는 퇴적층의 퇴적시기는 캄브리아기-오르도비스기, 데본기-석탄기, 쥐라기-고신생기에 해당된다(그림 5b). 이번에 백악기 진주층에서 한국 최초로 보고되는 방해석 비프 역시 시기적으로 산출 빈도가 가장 높은 백악기 초기에 해당된다. Cobbold *et al.* (2013)은 이와 같은 연대분포가 전 세계 유전의 탄산염 저류암의 분포와 유사하다는 점을 근거로 방해석 비프가 대기 중의 이산화탄소 농도가 높은 따뜻한 시기에 주로 형성되었을 것이라고 가정하였다. 대부분의 방해석 비프가 해양환경에서 형성된 세일에서 발견된다는 사실도 이와 같은 가정을 뒷받침한다. 하지만 진주층 비프의 경우 전형적인 호수퇴적층에서 산출되는데, 전세계에서 지금까지 발견된 110곳의 방해석 비프 중 모암이 호수퇴적층인 경우는 미국과 브라질 3곳에 불과하므로 희소성이 높다고 할 수 있다. 또한 지금까지 발견되지 않았던 동북아의 태평양 서쪽 주변부에서 발견되었다는 점에서 지역적인 중요성도 높은 것으로 보인다.

이 논문에서는 백악기 진주층에서 발견되는 방해석 비프의 산상과 기초적인 예비연구 결과에 대해 보고하였지만, 진주층 비프의 형성 기작을 명확히 이해하기 위해서는 앞으로 유체포유물을 이용한 형성 온도 규명, 전자현미분석을 이용한 조성 분석, 주사전자현미경 관찰을 통한 내부구조 관찰, 안정동위원소 분석을 이용한 비프의 기원 규명 등 추가 연구가 수행되어야 하며, 이와 같은 추가 연구는 경상분지의 진화사를 이해하는데 중요한 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2013R1

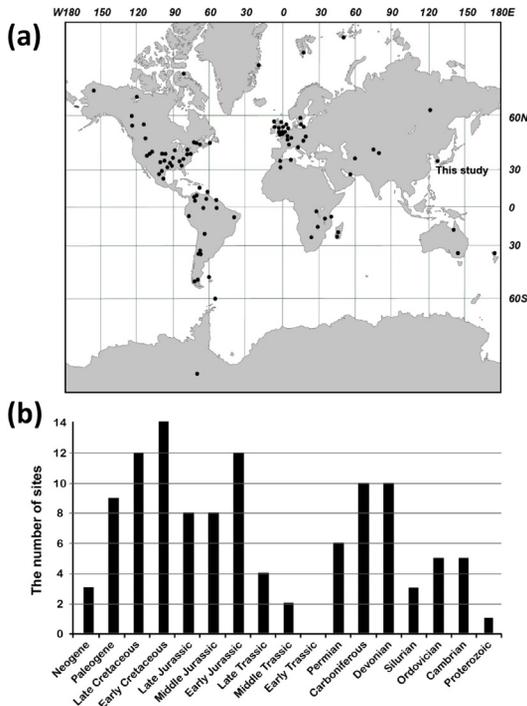


Fig. 5. Worldwide localities (a) and histograms of stratigraphic ages of host rocks (b) for occurrence of calcite beif (modified from Cobbold *et al.*, 2013).

A1A2012847)이며, 제1저자(하수진)는 2014년 하반기 한국석유공사 석유개발장학금을 지원받았고 이에 감사드립니다. 논문을 검토하고 좋은 의견을 제시해 주신 부경대학교 김영석 교수님과 익명의 심사위원, 양우현 편집위원님 및 편집위원장님께 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

- Bons, P.D., Elburg, M.A. and Gomez-Rivas, E., 2012, A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *Journal of Structural Geology*, 43, 33-62.
- Bons, P.D. and Jessell, M.W., 1997, Experimental simulation of the formation of fibrous veins by localised dissolution-precipitation creep. *Mineralogical Magazine*, 61, 53-63.
- Cheong, T.J., Oh, J.H., Son, J.D., Bong, P.Y., Lee, H., Ryu, B.J., Son, B.K., Kwon, Y.I., Hwang, I.G., Lee, Y.J. and Kim, H.Y., 1997, Petroliferous basin analysis in Taegu area (II). In: *Petroleum Resources Assessment, KIGAM Research Report KR-97(C)-18*, pp. 193-313, Korea Institute of Geology, Mining & Materials, Taejon, Korea. (in Korean).
- Choi, D.K., 1985, Spores and pollen from the Gyeongsang Supergroup, southeastern Korea and their chronologic and paleoecologic implications. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 1, 33-50.
- Choi, D.K. and Park, J.B., 1987, Palynology of the Jinju Formation (Lower Cretaceous), Waegwan-Daegu and Jinju areas, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 3, 28-43.
- Choi, H.I., 1986, Sedimentation and evolution of the Cretaceous Gyeongsang Basin, southeastern Korean. *Journal of the Geological Society, London*, 143, 29-40.
- Cobbold, P.R. and Rodrigues, N., 2007, Seepage forces, important factors in the formation of horizontal hydraulic fractures and bedding-parallel fibrous veins ("beef" and "cone-in-cone"). *Geofluids*, 7, 313-332.
- Cobbold, P.R., Zanella, A., Rodrigues, N. and Loseth, H., 2013, Bedding-parallel fibrous veins (beef and cone-in-cone): Worldwide occurrence and possible significance in terms of fluid overpressure, hydro carbon generation and mineralization. *Marine and Petroleum Geology*, 43, 1-20.
- Durney, D.W. and Ramsay, J.G., 1973, Incremental strains measured by syntectonic crystal growth, in: de Jong, K.A., Scholten, R. (eds.), *Gravity and Tectonics*. Wiley, New York, 67-96.
- Elburg, M.A., Bons, P.D., Foden, J. and Passchier, C.W., 2002, The origin of fibrous veins: constraints from geochemistry. *Geological Society, London, Special Publications* 200, 103-118.
- Fisher, D.M. and Brantley, S.L., 1992, Models of quartz overgrowth and vein formation: Deformation and episodic fluid flow in and ancient subduction zone. *Journal of geophysical research*, 97, 20043-20061.
- Hilgers, C. and Urai, J.L., 2002, Microstructural observations on natural syntectonic fibrous veins: implications for the growth process. *Tectonophysics*, 352, 257-274.
- Keulen, N.T., den Brok, S.W.J. and Spiers, C.J., 2001, Force of crystallisation of gypsum during hydration of synthetic anhydrite rock. 13th DRT conference, Deformation Mechanisms, Rheology, and Tectonics, Noordwijkerhout, The Netherlands.
- Kobayashi, T. and Suzuki, K., 1936, Non-marine shells of the Naktong-Wakino Series. *Japanese Journal of Geology and Geography*, 13, 243-257.
- Lee, T.-H., Park, K.-H., Chun, J.-H. and Yi, K., 2010, SHRIMP U-Pb zircon ages of the Jinju Formation and Silla Conglomerate, Gyeongsang Basin. *Journal of the Petrological Society of Korea*, 19, 89-101 (in Korean with English abstract).
- Lee, Y.I., Choi, T., Lim, H.S. and Orihashi, Y., 2010, Detrital zircon geochronology of the Cretaceous Sindong Group, Southeast Korea: implications for depositional age and Early Cretaceous igneous activity. *Island Arc*, 19, 647-658.
- Lim, H.S., Lee, Y.I. and Min, K.D., 2003, Thermal history of the Cretaceous Sindong Group, Gyeongsang Basin, Korea based on fission track analysis. *Basin Research*, 15, 139-152.
- McCaig, A.M., Wayne, D.M., Marshall, J.D., Banks, D. and Henderson, I., 1995, Isotopic and fluid inclusion studies of fluid movement along the Gavarnie Thrust, Central Pyrenees: reaction fronts in carbonate mylonites. *American Journal of Science*, 295, 309-343.
- Means, W.D. and Li, T., 2001, A laboratory simulation of fibrous vein: some first observations. *Journal of Structural Geology*, 23, 857-863.
- Nomura, S.F., Sawakuchi, A.O., Bello, R.M.S., Méndez-Duque, J., Fuzikawa, K., Giannini, P.C.F. and Dantas, M.S.S., 2014, Paleotemperatures and paleofluids recorded in fluid inclusions from calcite veins from the northern flank of the Ponta Grossa dyke swarm: Implications for hydrocarbon generation and migration in the Paraná Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 52, 107-124.
- Oh, J.H., Kwak, Y.H., Son, J.D., Cheong, T.J., Ryu, B.J.,

- Son, B.K., Hwang, I.G., Lee, Y.J., Kim, H.J. and Ko, J., 1996, Petroliferous basin analysis in Jinju area (II). In: Petroleum Resources Assessment, KIGAM Research Report KR-95(C)-24, pp. 185-301, Korea Institute of Geology, Mining & Materials, Taejon, Korea.
- Oliver, N.H.S. and Bons, P.D., 2001, Mechanisms of fluid flow and fluid-rock interaction in fossil metamorphic-hydrothermal systems inferred from vein-wallrock patterns, geometry, and microstructure. *Geofluids*, 1, 137-163.
- Ramsay, J.G., 1980, The crack-seal mechanism of rock deformation. *Nature*, 284, 135-139.
- Rodrigues, N., Cobbold, P.R., Loseth, H. and Ruffet, G., 2009, Widespread bedding-parallel veins of fibrous calcite ('beef') in a mature source rock (Vaca Muerta Fm, Neuquen Basin, Argentina): evidence for overpressure and horizontal compression. *Journal of the Geological Society, London*, 166, 695-709.
- Son, B.-K., Cheong, T.-J., Oh, J.-H. and Kwak, Y.-H., 1994, Thermal maturation and diagenesis of the Gyeongsang Supergroup, Euseong Area, SE Korea. *Korean Journal of Petroleum Geology*, 2, 83-90 (in Korean with English abstract).
- Sorby, H.C., 1860, On the origin of 'cone-in-cone', British Association for the Advancement of Science. Report of the 29th meeting, 1859, *Transactions of Sections, Geology*, 124.
- Stoneley, R., 1983, Fibrous calcite veins, overpressures, and primary oil migration. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 67, 1427-1428.
- Swarbrick, R.E., Osborne, M.J. and Yardley, G.S., 2002, Comparison of overpressure magnitude resulting from the main generating mechanisms. In: Huffman, A.R., Bowers, G.L. (Eds.), *Pressure Regimes in Sedimentary Basins and Their Prediction*. American Association of Petroleum Geologists Memoir, vol. 76, 1-12.
- Taber, S., 1918, The origin of veinlets in the Silurian and Devonian strata of New York. *Journal of Geology* 26, 566-63.
- Wiltshchko, D.V. and Morse, J.W., 2001, Crystallization pressure versus "crack seal" as the mechanism for banded veins. *Geology*, 29, 79-82.
- Yi, M.-S., Cho, B.-H. and Chi, J.-M., 1994, Palynomorphs from the Jinju Formation in the Euseong area, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 10, 41-56.
- Yi, M.-S., Choi, S.-J. and Yun, H., 1993, Cretaceous palynomorphs from the Iljik Formation in the Euseong area, Korea. *Journal of the Paleontological Society of Korea*, 9, 166-179.
- Zanella, A. and Cobbold, P.R., 2012, 'Beef': Evidence for fluid overpressure and hydraulic fracturing in source rocks during hydrocarbon generation and tectonic events: field studies and physical modelling. *Geofluids VII International Conference*, Rueil-Malmaison, May 2012.
- Zanella, A., Cobbold, P.R. and Rojas, L., 2014, Beef veins and thrust detachments in Early Cretaceous source rocks, foothills of Magallanes-Austral Basin, southern Chile and Argentina: Structural evidence for fluid overpressure during hydrocarbon maturation. *Marine and Petroleum Geology*, 55, 250-261.

Received : September 23, 2015

Revised : December 21, 2015

Accepted : December 23, 2015