

습곡된 부딘구조의 기하학적 및 운동학적 발달특성

최진혁¹ · 김영석^{1,*} · 김정빈²

¹부경대학교 지구환경과학과

²순천대학교 물리교육과

요 약

부딘구조와 습곡구조가 공존하는 암석의 변형이력을 알아보기 위하여, 동일한 지층에서 이들 두 지질구조가 관찰되는 단면노두 및 2개의 전선에 대하여 기하학적 분석을 실시하였다. 부딘은 습곡의 힌지대에서는 습곡구조를 따라 휘어진 반면 날개부에서는 서로 포개진 형태로 나타난다. 습곡의 날개부에서는 부딘의 포개진 방향이나 회전 방향을 통해 전단운동 및 이들의 운동감각을 추론할 수 있으며, 이들은 습곡축면을 기준으로 대칭적인 양상을 보인다. 이러한 기하학적 특성은 부딘이 형성된 이후 전단운동을 수반한 습곡작용을 겪은 습곡된 부딘임을 지시한다. 일반적으로 한 번의 안정상태 변형에서는 변형되는 대상물이 수축영역에서 신장영역으로 회전될 수 있으나 그 반대 현상은 발생하지 않기 때문에, 부딘된 습곡과는 달리 습곡된 부딘은 다단계변형에 의해서만 형성될 수 있다. 따라서 동일한 지층에서 부딘과 습곡이 동시에 관찰될 경우, 힌지대(습곡작용)와 양쪽 날개부(대칭적인 포개짐 또는 전단운동)에서 각각의 부딘이 보이는 특징이 다단계변형작용에 의하여 형성된 습곡된 부딘을 판단하는 중요한 지시자 역할을 할 수 있다.

주요어: 부딘된 습곡, 습곡된 부딘, 점진변형, 다단계변형

Jin-Hyuck Choi, Young-Seog Kim and Cheong-Bin Kim, 2013, Geometric and kinematic characteristics of the folded boudin structures. Journal of the Geological Society of Korea. v. 49, no. 5, p. 553-563

ABSTRACT: To examine the deformation history of deformed rocks coexisting boudin and fold structures, we analyzed an outcrop and two loose rocks showing both boudin and fold along the same layers. The boudin structures are commonly folded at fold hinge zones, but are stacked like roof tiles along fold limbs. The stacked or rotated directions of boudin structures, showing a symmetric pattern about the axial plane, could give some information on shear sense along fold limbs. These results imply that the layers were firstly boudinaged, and then folded later associated with shearing at fold limbs. In the steady-state progressive deformation, material lines rotate only from shortening into extensional field. This means that folded boudin structures can only be developed by polyphase deformation. Boudin trains showing characteristic geometries at hinge zones (folded) and limbs (symmetrically stacked or sheared) could be obvious evidences for folded boudin structures associated with polyphase deformation.

Key words: Boudinaged folds, folded boudin structures, progressive deformation, polyphase deformation

(Jin-Hyuck Choi and Young-Seog Kim, Dept. of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea; Cheong-Bin Kim, Dept. of Physics Education, Suncheon National University, Suncheon 540-950, Korea)

1. 서 언

구조지질학에서는 변형된 암석으로부터 획득한 응력변형(*strain*)의 정보로부터 변형된 암석과 이 암석을 포함하고 있는 지역이 어떤 응력(*stress*)조건에

서 어떤 과정을 통하여 변형작용(*deformation*)을 겪어왔는지를 해석한다(e.g., Marrett and Peacock, 1999; Twiss and Moores, 2007). 일반적으로 응력변형 상태를 분석하기 위해서는 층리, 암맥, 화석 등과 같이 변형받기 이전의 상태가 잘 알려진 대상물이 암석 내

* Corresponding author: +82-51-629-6633, E-mail: ysk7909@pknu.ac.kr

에 존재해야 한다. 이들로부터 변형된 암석에 나타나는 특정 대상물의 최종적인 응력변형 상태와 이들의 변형 전 상태를 비교함으로써 암석이 겪은 변형의 기작과 이력에 대해 이해할 수 있다. 그러나 지질구조의 변형특성을 해석하는데 있어 간과해서는 안 되는 가장 중요한 점 중 하나는, 일반적으로 암석에 기록되어 있는 응력변형은 단지 응력변형의 최종상태만을 보여줄 뿐, 그 동안 겪어왔던 모든 변형이력들을 드러내지 않는다는 점이다.

각 유형의 지질구조에 대한 변형기작들이 잘 알려져 있기 때문에, 대체적으로 한 유형의 지질구조가 우세하게 발달된 암석에서는 변형이력과 같은 변형특성을 추론하는 것이 어렵지 않다. 그러나 서로 다른 특성을 보이는 지질구조들이 함께 기록되어 있는 암석의 경우, 변형이력 및 변형단계에 대해 해석하는 것이 쉽지 않다. 이와 같은 가장 대표적인 예 중의 하나가 신장에 의한 부딘과 수축에 의한 습곡이 한 노두의 동일한 지층에서 관찰되는 경우이다. 이러한 구조는 크게 '부딘된 습곡(*boudinaged folds*)' 또는 '습곡된 부딘(*folded boudins*)'으로 해석될 수 있으나, 이들의 명확한 구조적 관계를 파악하기 위해서는 부딘과 습곡 발달 사이의 선후관계에 대한 추가적인 정보나 증거가 요구된다. 또한 이들 두 구조는 한번 또는 여러 번의 변형단계를 거쳐 형성될 수 있다 (e.g., Smith, 1975; Goscombe *et al.*, 2004). 다시 말해 두 지질구조의 선후관계 뿐만 아니라, 이들이 연속적이고 점이적인 한 번의 점진변형(*progressive de-*

formation)에 의한 것인지, 아니면 각각 분리된 두 번 이상의 변형단계를 거친 다단계변형(*polyphasal deformation*)에 의한 것인지를 판단하는 것이 쉽지 않다.

이번 연구에서는 부딘과 습곡이 함께 관찰되는 암석을 대상으로 지질구조의 발달특성과 변형이력에 대해 알아보려고 하였다. 이를 위해 부딘과 습곡이 동시에 관찰되는 단면노두와 전석에 대한 기재 및 분석을 실시하였다. 이러한 분석을 바탕으로 부딘과 습곡에 대한 기하학적 발달특성을 해석하여 이들 두 지질구조의 상대적인 선후관계를 추론하였다. 또한 두 지질구조가 점진변형 동안 동시에 형성될 수 있는지에 대한 정보를 획득하고자 점진변형에서의 응력변형모델을 검토하였으며, 부딘된 습곡 및 습곡된 부딘의 변형단계와 운동학적 변형이력, 그리고 관찰된 노두에서의 구조들을 비교 및 검토하였다. 특히, 변형이력의 해석에 있어 혼란스러울 수 있는 부딘된 습곡과 습곡된 부딘의 기하학적 발달 특성에 있어 어떠한 차이점이 있는지에 주목하였다.

2. 부딘과 습곡의 일반적인 변형특성

부딘과 습곡의 형태는 온도, 응력변형속도, 층간 점성차 등에 큰 영향을 받으며, 이들의 다양한 형태는 변형이력에 대한 많은 정보를 제공한다(e.g., Hudleston and Lan, 1993; Goscombe *et al.*, 2004). 비록 부딘과 습곡이 다양한 구조적 환경과 규모에서 발달할 수 있으나, 이번 연구에서 주로 다루는 것은 이들의

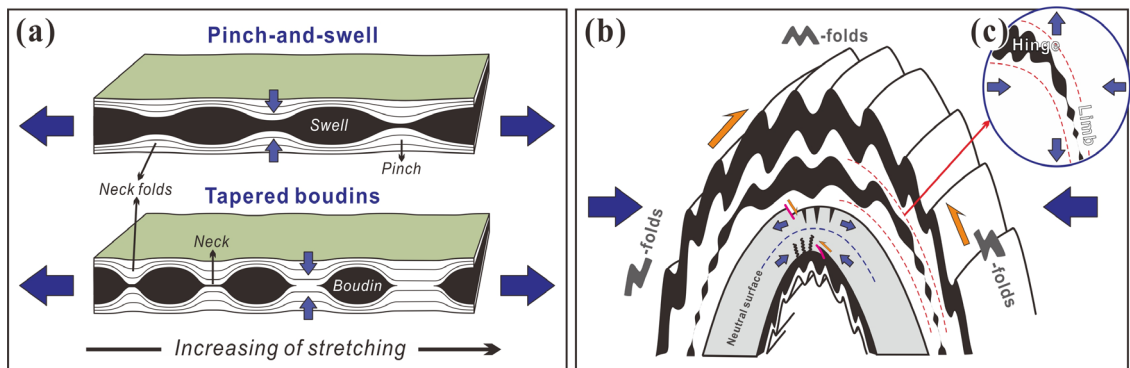


Fig.1. (a) Geometry and descriptive terminology of pinch-and-swell and tapered boudin structures (modified from Fossen, 2010). (b) Various secondary or higher-order structures of folds. Z-, M-, and S-folds, local extensional and contractional structures could be developed along limbs or at hinge zones (modified from Fossen, 2010). (c) Progressively boudinaged folds along fold limbs.

기하학적 특성 및 변형이력과 관련된 것이므로 이곳에서는 전형적인 부딘과 습곡의 발달특성에 대해서만 간략히 언급하고자 한다.

2.1 부딘(Boudin)

부딘은 지층에 평행한 인장력에 의해 형성되는 신장구조로, 상대적으로 유동성이 낮은 지층들이 분리 또는 거의 분리되어 있는 특징을 보이며(e.g., Ramsay and Huber, 1987; Ghosh and Sengupta, 1999; Goscombe *et al.*, 2004), 유사한 지질구조로는 부딘 같은 요소들이 가까스로 연결되어 있는 팽창구조(*pinch-and-swell*)가 있다(그림 1a).

부딘들 사이의 목에는 국부적인 습곡(*neck folds*; 그림 1a)이 발달할 수 있으며, 이는 부딘을 둘러싸고 있는 유동성이 높은 지층들의 휨작용에 의한 것이다(e.g., Fossen, 2010). 휨작용은 수동적인 습곡작용에 의한 변형기작으로, 다음에 다룰 일반적인 능동적 습곡작용과는 구별되는 국부적인 응력변형의 결과이다.

2.2 습곡(Fold)

일반적인 능동적 습곡작용(또는 좌굴작용)은 층리에 평행한 압축력에 의해 지층이 수축될 때 발달한다(e.g., Biot, 1961; Ramsay, 1967; Hudleston and Lan, 1993). 습곡작용은 지층의 휘어짐뿐만 아니라, 습곡 내 다양한 소습곡 및 2차 지질구조를 발달시킨다(그림 1b).

습곡작용으로 휘어진 지층이 국부적으로 신장될 때에도 부딘이나 팽창구조가 발달할 수 있으며, 이 경우에는 습곡의 날개부에서만 단속적으로 발달하는 특성을 보인다(그림 1c). 이것은 원래 압축력의 방향과 평행했던 지층이 점차 인장력의 방향과 평행하게 회전됨으로써 최종적으로 지층이 신장된 것으로 해석할 수 있다(e.g., Ramsay, 1967; Holst and Fossen, 1987). 이는 부딘과 습곡이 동시에 형성될 수 있음을 보여주는 한 예로써, 이러한 점진변형에 의한 변형이력은 이 논문의 제4장에서 자세히 다루도록 하겠다.

3. 부딘 및 습곡된 암석에 대한 기재와 분석

부딘과 습곡이 동시에 관찰되는 암석의 변형이력은 같은 지역적인 응력조건 하에 있지만 변형이 진

행됨에 따라 변형의 영역이 바뀌게 되는 점진변형 또는 지역적인 응력조건 자체가 바뀌는 다단계변형에 의한 부딘된 습곡 내지 습곡된 부딘 등과 같이 다양하게 해석될 수 있다. 부딘과 습곡이 동시에 관찰되는 암석의 변형이력에 대한 여러 가능성을 전제로, 이들 두 지질구조가 공존하는 지층에 대한 기하학적 분석을 시도하였다. 특히 습곡의 힌지대와 날개부에서 특징적으로 관찰되는 변형기작에 대한 정보에 대해 중점적으로 기재하였으며, 두 지질구조가 형성된 상대적인 선후관계 또는 운동학적 특성을 지시하는 구조적 양상에 주목하였다.

3.1 단면노두 분석

전라남도 화순군 북면의 수리마을 도로 절개면에는 동일한 암층에 부딘과 습곡이 동시에 관찰된다. 조사지점 주변의 지질은 변성퇴적암류로 구성된 시대미상의 용암산층 및 설옥리층, 그리고 고생대 평안누층군과 결정질 응회암층이 남북방향으로 분포하고 있으며, 이들을 둘러싸는 화강암질암과 백악기 화산암류로 구성되어 있다(Kim and Park, 1966; Lee, 1992; 그림 2). 화강암질암과 결정질 응회암의 접촉부를 따라 남북방향의 우수향 주향이동 전단대가 발달하고 있으며, 전단대의 서측으로는 전단대와 평행한 방향의 엽리, 역단층, 습곡 등이 발달한다(그림 2).

단면노두 분석이 실시된 설옥리층은 탄산염암 및

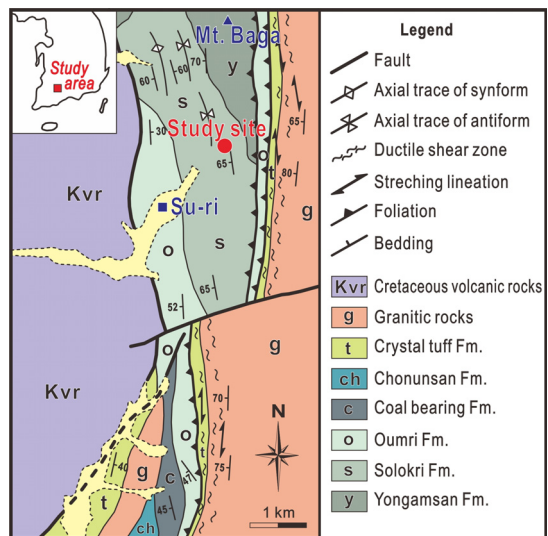


Fig.2. Geological map around the study site in Hwasun, southwest Korea (modified from Lee, 1992).

탄산규산염암으로 대부분 구성되어 있고, 천매암질 암 내지 운모편암과 렌즈상의 대리암이 협재되어 있다. 이 지층에는 엽리의 주향과 거의 평행한 부딘구조 및 층간 소습곡이 발달하는데, 이들은 평안누층군에서는 관찰되지 않아 평안누층군 이전 변형작용의 결과로 해석된 바 있다(Lee, 1992). 또한 이들은 남북방향의 전단운동 및 습곡축으로 대표되는 후기의 변형작용에 의해 재변형된 결과를 보인다.

부딘과 습곡이 동시에 관찰되는 단면노두에서는 비교적 엷은 회색의 대리암 지층이 응력변형의 최종 상태를 잘 보여준다(그림 3a). 이 지층은 연속적인 형태보다는 여럿으로 분리되어 있는 것으로 보아 부딘작용을 겪었음을 알 수 있다(Lee, 1992). 휘어진 지층의 경우, 조사지점 주변에서는 대규모 전단대를 중심으로 습곡과 층상단층이 잘 관찰되는 것으로 보아 강한 전단운동 및 습곡작용을 겪은 것으로 판단된다.

먼저 습곡에 대해 살펴보면, 대략 북동 방향의 전향을 보이는 배사형 습곡으로 양쪽 날개부가 거의 평행에 가까운 등사습곡의 특징을 보인다(그림 3a). 엷은 회색을 띠는 대리암 지층을 기준으로, 층의 두께가 힌지대로 갈수록 얇아지는 반면 양쪽의 날개부에서는 비교적 두껍고 일정한 양상을 보인다. 이 지층 주위에는 조밀한 간격을 보이는 엽리들이 이 지층의 일반적인 방향성과 평행하게 발달하면서 휘

어져 있다. 남서쪽 날개부 주위의 일부 엽리를 따라서는 전단운동을 지시하는 소규모 구조들이 관찰되며, 이들은 역단층성 전단운동을 지시한다(그림 3b, 3c).

다음으로 부딘의 발달형태를 살펴보면, 각각의 부딘들은 양쪽으로 갈수록 얇아지는 전형적인(비스듬히 놓인) 렌즈상의 형태를 보인다. 가장 흥미로운 점 중 하나는 각 부딘 사이의 목을 뚜렷이 관찰할 수 없다는 것으로, 대신에 각각의 부딘들이 꼬리를 갖고 서로 포개져 있는 양상을 보인다(그림 3d). 이는 주로 습곡의 남서쪽 날개부에서 잘 관찰되며, 체계적으로 아래쪽 부딘이 위쪽 부딘을 상대적으로 층상하는 역단층성 전단운동감각을 잘 보여준다. 이와는 대조적으로 습곡의 북동쪽 날개부에서 관찰되는 부딘의 포개짐은 정단층성 전단운동감각을 지시하고 있다. 습곡의 힌지부에서는 날개부와는 달리 각 부딘이 주로 휘어진 특성을 보인다(그림 3d).

부딘이 포개진 방향을 통해 추론할 수 있는 양쪽 날개부의 전단운동감각은 습곡축면을 기준으로 대칭적인 특성을 보이는데(그림 3d), 이는 전단운동이 습곡작용에 수반된 것임을 간접적으로 지시한다. 각각의 부딘 내에서 관찰되는 엽리들 또한 휘어져 있으며(그림 3d), 이는 습곡작용 또는 이에 수반된 전단운동이 상대적으로 후기에 발생하였다는 것을 지시한다.

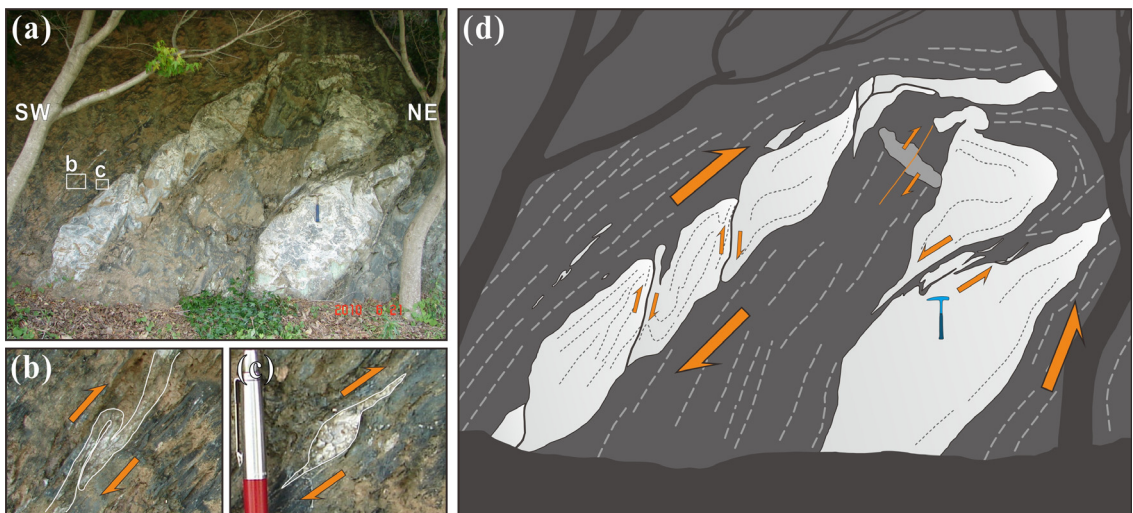


Fig. 3. (a) Folded boudin trains on road-cut section. (b, c) Minor structures indicating shear sense along fold limbs. (d) Sketch of the folded boudin trains. Boudins at hinge zones commonly show folded pattern, while boudin blocks along limbs show stacked (or roof tile) pattern.

3.2 전석 분석

강원도 정선군의 몰운대 인근에 위치한 한치마을 앞 하천에서 부딘과 습곡구조가 잘 관찰되는 두 개의 전석을 수집하여 분석을 실시하였다. 이 지역 주변의 지질은 조선누층군에 속하는 지층들과 후에 이를 관입한 화강암류 및 맥암류로 주로 구성되어 있다. 이 지역에 분포하는 조선누층군은 선캠브리아기의 변성퇴적암류를 부정합으로 덮고 있는 장산규암을 기저로 하여 묘봉층과 풍춘석회암층 등으로 이루어져 있다. 전석들은 암회색을 띠며 1~5 cm 두께의 석회암층을 협재하고 있어 주변의 조선누층군 암석을 모암으로 하는 것으로 판단된다(그림 4, 5).

그림 4a 전석에는 비교적 열은 회색의 석회암층들이 분리되어 있음과 동시에 관찰면 상에서 누워있는 S자 형태의 비대칭 습곡이 발달한다. 분리된 층들은 대부분 렌즈상의 형태를 보이며, 따라서 부딘 내지 팽창구조가 발달했던 것으로 판단된다. 부딘의 종횡비(*aspect ratio*: 부딘의 상하 두께에 대한 좌우 폭의 비율)는 비교적 큰 편이고, 일부 부딘들 사이에는 부딘 목이

발달하기도 하지만 대부분 포개져 있다(그림 4b, 4c).

부딘이 서로 겹쳐진 형태는 습곡의 날개부에서 주로 관찰되는데, 겹쳐진 방향은 체계적으로 양쪽 날개부에서 정반대로 나타난다. 즉, 긴 날개부에서는 상대적으로 오른쪽에 놓인 부딘이 왼쪽 부딘의 위쪽에 포개져 있는 반면에(그림 4c), 짧은 날개부에서는 왼쪽 부딘이 오른쪽 부딘의 위쪽에 포개져 있다(그림 4d). 이는 관찰면을 수평면으로 가정했을 때, 긴 날개부를 따라 좌수향, 짧은 날개부를 따라 우수향의 전단운동감각을 지시하는 것으로, 습곡축면을 기준으로 대칭적이다. 일부 부딘은 회전된 특성을 보이며, 이 또한 포개진 형태를 통해 유추한 전단운동감각과 동일한 전단운동감각을 지시한다(그림 4e).

습곡의 한지대에서 관찰되는 부딘은 날개부와 유사하게 겹쳐져 있는 양상을 일부 보이기도 하나, 각각 분리된 부딘 자체가 휘어져 있는 특성을 보인다(그림 4d). 이와 같은 기하학적 분석결과는 앞서 언급한 단면노두와 거의 유사하며, 따라서 부딘이 형성된 이후 전단운동을 수반한 습곡작용으로 인해 휘

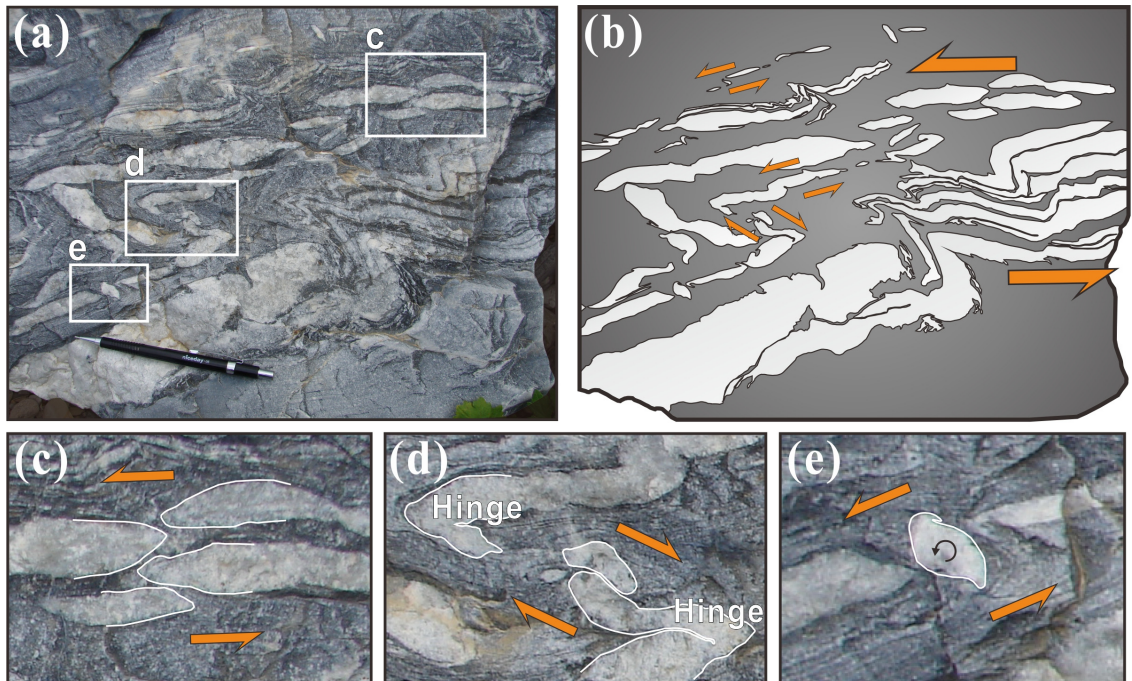


Fig. 4. (a) Folded boudin trains on a loose rock fragment, Jeongseon, northeast Korea. (b) Sketch of the folded boudin trains. Boudins are commonly stacked along the limbs of asymmetric (S-)folds. (c) Stacked patterns indicate left-lateral shear sense along the longer limbs. (d) Shorter limbs show right-lateral shear sense and boudins are commonly folded at hinge zones. (e) Anticlockwise rotation of a boudin block associated with left-lateral shear accompanied by folding.

어지거나 포개진 것으로 판단된다.

그림 5a 전석에서는 흰색 석회암층의 두께 변화 및 분리되거나 휘어진 특징을 통해 팽창구조 내지 부딘뿐만 아니라 S자 형태의 비대칭 습곡이 발달함을 알 수 있다. 이곳에서의 팽창구조는 주로 서로 겹쳐진 특성을 보이며, 특히 좌측 하단부에는 소규모 부딘들이 서로 포개진 형태를 보인다(그림 5b). 비대칭습곡의 전향이나 팽창구조가 포개진 형태를 통해 주로 좌수향의 전단운동감각을 확인할 수 있다. 단, 전석 내 가장 위쪽의 두꺼운 흰색 지층은 향사형 습곡형태를 보이는데, 양쪽의 날개부에서 팽창구조들은 서로 다른 방향으로 포개져 있으며, 이를 통해 유추한 전단운동감각은 습곡측면을 기준으로 대칭적이다(그림 5b). 이를 통해 양쪽 날개부를 따른 서로 다른 운동감각의 전단운동을 추론할 수 있으며, 따라서 이러한 분석결과는 이미 형성된 팽창구조가 이후 습곡작용 및 이에 수반된 전단운동을 겪었음을 지시한다.

3.3 부딘 및 습곡된 암석의 변형이력

단면노두 및 전석에서 관찰되는 부딘과 습곡의 발달특성에 대한 기하학적 분석 결과, 일부 공통적이고 특징적인 발달형태를 다음과 같이 확인하였다. 첫 번째로, 최종적인 구조에서는 각 부딘 사이의 목이 잘 관찰되지 않지만, 자세히 관찰하면 대부분의 부딘들이 목부분에서 접혀서 서로 포개져 있는 형태를 보인다. 단, 습곡의 날개부에서는 포개진 양상이

뚜렷한 반면 한지대에서는 각 부딘이 휘어진 형태를 보인다. 두 번째로, 부딘이 포개진 형태와 방향을 통해 습곡 날개부에서의 전단운동을 추론할 수 있다. 특히 양쪽 날개부에서 관찰되는 전단운동감각 및 소 습곡들이 습곡측면을 기준으로 대칭적인 것으로 보아, 이러한 전단운동은 능동적 습곡작용에 수반되어 일어났음을 알 수 있다(그림 1b).

이러한 특성은 부딘과 습곡이 형성된 상대적인 선후관계를 잘 보여준다. 다시 말해 부딘이 형성된 이후 광역적인 습곡작용 및 이에 수반된 비대칭습곡 또는 전단운동을 겪었음을 지시하며, 이는 결국 습곡된 부딘이라는 것을 의미한다.

4. 점진변형 동안의 변형이력

앞서 우리는 부딘과 습곡이 동시에 관찰되는 암석을 대상으로, 이들의 기하학적 특성을 통해 두 지질구조가 형성된 상대적인 선후관계를 추론하였다. 그러나 이러한 기재적인 접근만으로 변형된 암석의 변형단계와 같은 운동학적 특성을 추론하기엔 한계가 있다. 다시 말해 부딘된 습곡 또는 습곡된 부딘의 경우, 이들이 한 번의 변형단계 동안 연속적으로 형성되었는지, 아니면 두 번의 분리된 변형단계를 겪었는지 파악하기란 쉽지 않다. 이 때 비교적 유용한 분석방법 중 하나는 두 지질구조가 한 번의 변형단계 동안에 형성될 수 있는지를 평가하는 것이다.

서로 다른 특성의 두 지질구조가 함께 발달할 수

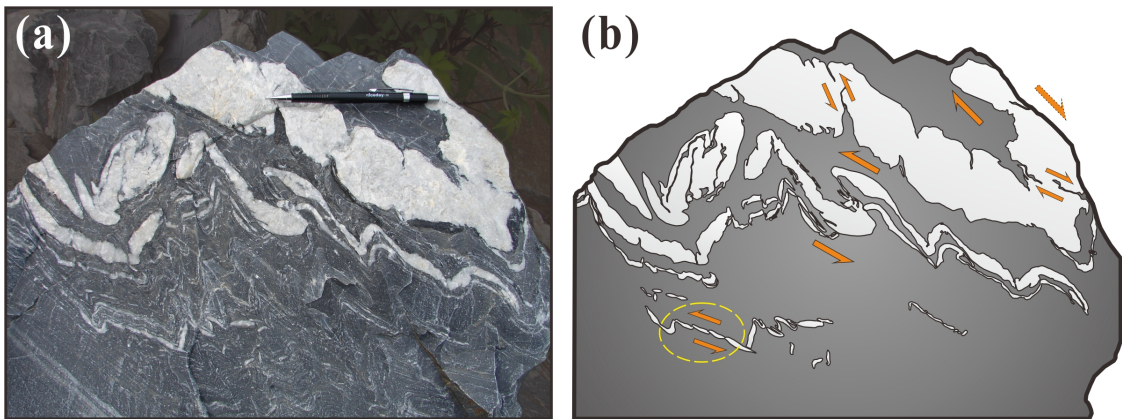


Fig. 5. (a) General view and (b) sketch of the folded pinch-and-swell (or boudin) structures on a loose rock fragment, Jeongseon, northeast Korea. Pinch-and-swells at hinge zones are characterized by folded patterns, while stacked patterns of boudin are dominant along the fold limbs (particularly, roof-tile pattern in lower left corner).

있는 경우는 크게 부딘 사이의 휨작용에 의한 수동적 습곡(그림 1a), 습곡의 한지대에서 관찰되는 소규모 인장성 지질구조와 같은 국부적인 변형(그림 1b), 또는 동일한 응력조건에서의 점진변형(그림 1c)으로 나눌 수 있다. 국부적인(또는 차수가 다른) 변형 구조들은 비교적 다양한 환경과 규모에서 여러 원인으로 인해 발생할 수 있기 때문에 매우 중요한 논제 중 하나이다. 그러나 이번 연구에서는 변형이력과 변형단계에 대해 중점적으로 다루고 있기 때문에 한번의 변형단계 동안 형성되는 부딘된 습곡 및 습곡된 부딘에 대한 응력변형모델에 대해 알아보고, 이들 사이에 어떠한 차이점이 있는지 살펴보고자 한다.

4.1 비안정상상태 변형

비안정상상태의 점진변형 동안에 다양한 변형이력을 보이는 응력변형이 발생할 수 있다. 그림 6a는 최종응력변형타원 및 순간응력변형타원 간에 순간신장축이 회전하는 비안정상상태 변형의 예를 보여준다 (Twiss and Moores, 2007). 최종응력변형타원 내 각 영역은 변형 전 상태에서는 모두 같은 길이인 임의의 기준선들에 대한 길이변화를 통해 신장영역(L: lengthening)과 수축영역(S: shortening)으로 구분된다. 이는 변형이력 중 한 시점에서의 응력변형을 의미하는 순간응력변형타원에서 유사하게 관찰되는데, 단 신장(\dot{L}) 및 수축영역(\dot{S})은 특정 시점에서 기준선들이 신장 또는 수축되고 있음을 의미할 뿐, 변형 전 상태와 최종변형의 상대적인 차이를 뜻하지는 않는다.

변형이력의 기준이 되는 일부 임의의 선들은 최

종 및 순간응력변형타원에서 다른 영역에 포함될 수 있다(그림 6a). 이러한 결과는 한 번의 변형단계 동안에도 계속적인 신장($L\dot{L}$)이나 수축($S\dot{S}$)뿐만 아니라, 수축되고 있으나 이전의 신장으로 인해 여전히 신장되어 있거나($L\dot{S}$), 신장되고 있으나 이전의 수축으로 인해 여전히 수축상태로 남아 있음($S\dot{L}$)을 보여준다. 이와 같은 다양한 변형이력에 대해, 기준선의 신장은 지층의 부딘으로 나타나고 수축은 습곡으로 표현될 수 있다(그림 6b). 다시 말해 비안정상상태 변형모델에서는 한 번의 변형단계 동안에도 한 지층에서 부딘, 습곡, 부딘된 습곡, 습곡된 부딘이 모두 이론적으로 형성될 수 있다(e.g., Ramsay, 1967; Twiss and Moores, 2007).

4.2 안정상태 변형: 점진적인 순수 및 단순전단

안정상태 변형에서의 점진변형 특성을 알아보기 위해, 순수전단과 단순전단 동안 발생할 수 있는 변형이력모델을 그림 7에 나타내었다. 두 경우에서, 변형 전 상태에서는 같은 길이인 모든 선들은 각각의 원래 방향에 따라 다양한 변형이력을 경험할 수 있다(Ramsay, 1967; Twiss and Moores, 2007; Fossen, 2010). 일부 선들은 계속적인 신장을 겪는 반면 다른 일부의 선들은 수축만을 겪을 수 있다. 나머지 일부는 수축되다가 신장되면서 최종적으로 변형 전의 길이보다 짧거나 길게 변형될 수 있으며, 후자의 경우 신장영역(즉, 그림 7a, c의 $L\dot{L}$ 영역 중 점선으로 경계지어진 비교적 밝은 색의 영역)에 속하게 된다. 이와 같은 예로 그림 1c의 부딘된 습곡을 들 수 있으며, 습곡의 한지대에서는 습곡작용이 계속 일어나는 반면

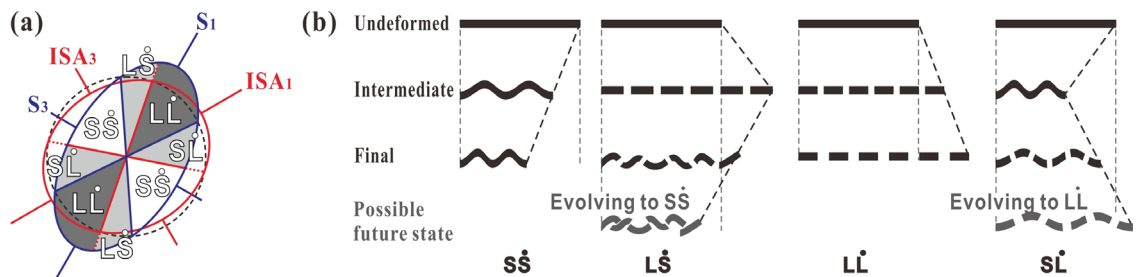


Fig. 6. Various deformation histories during non-steady state progressive deformation (modified from Twiss and Moores, 2007). (a) Combination of the two sets of sectors; pre-existing homogeneous and instantaneous strain ellipses. Radial material lines have been lengthened [L] or shortened [S] by the deformation, and are being lengthened [\dot{L}] or shortened [\dot{S}]. (b) Histories of progressive deformation for competent layers oriented within the different sectors.

날개부에서는 수축되던 지층의 회전에 의해 부딘이 형성될 수 있음을 잘 설명해준다.

이러한 변형이력의 다양성은 응력조건 및 순간신장축에 대한 지층의 방향성에 좌우되며, 부딘, 습곡, 부딘된 습곡과 같은 매우 다양한 지질구조가 한 지층에서 발달할 수 있음을 보여준다(그림 7b, 7d). 그러나 지층들이 수축에서 신장의 영역으로만 회전하고 그 반대는 일어나지 않기 때문에, 일반적으로 습곡된 부딘은 안정상태의 점진변형 동안에는 형성될 수 없다(e.g., Passchier, 1997; Goscombe *et al.*, 2004).

이러한 안정상태 변형모델의 결과는 비안정상태의 점진변형모델에서는 습곡된 부딘이 형성될 수 있다는 점에서 차이를 나타낸다. 비록 자연상태에서는 비안정상태 변형이 일어날 수 있으나(그림 6), 많은 경우에 여러 유동요소에 대한 정보를 획득하고 인지하기가 어렵다. 따라서 변형이력의 재구성 및 응력 변형 모델에 있어 거의 대부분은 순간신장축과 같은 유동요소가 일정하게 유지되는 안정상태 변형이 가정된다(Twiss and Moores, 2007; Fossen, 2010). 결론적으로 습곡된 부딘의 경우, 항상은 아니지만, 부딘이 형성된 뒤 이후의 다른 변형단계 동안 또 다른

변형작용이 중복되어 기록된 것으로 해석 할 수 있다(Passchier, 1997; Goscombe *et al.*, 2004; Fossen, 2010; 그림 7).

5. 토의: 부딘된 습곡? 습곡된 부딘?

부딘된 습곡과 습곡된 부딘은 부딘과 습곡의 변형특성이 중첩되어 기록되어 있다는 점에서 구별하기 어려울 수 있으나, 이를 구별함으로써 변형된 암석의 변형이력에 대한 많은 정보를 획득할 수 있기 때문에 매우 중요하다. 예를 들어 부딘된 습곡과 달리 습곡된 부딘은 일반적으로 변형된 암석이 응력조건이 다른 두 번의 변형단계를 겪었다는 사실을 내포한다(Passchier, 1997; Goscombe *et al.*, 2004). 이는 야외조사 시 부딘된 습곡과 습곡된 부딘의 기하학적 특성과 차이점을 인지하는 것이 매우 유용함을 의미한다.

만약 부딘이 어떤 형태로든 변형되어 관찰된다면, 거의 대부분은 이미 형성된 부딘이 후기의 변형단계 동안에 변형된 다단계변형을 지시하며, 이러한 가장 좋은 예 중 하나가 일련의 연속된 부딘(*boudin trains*)

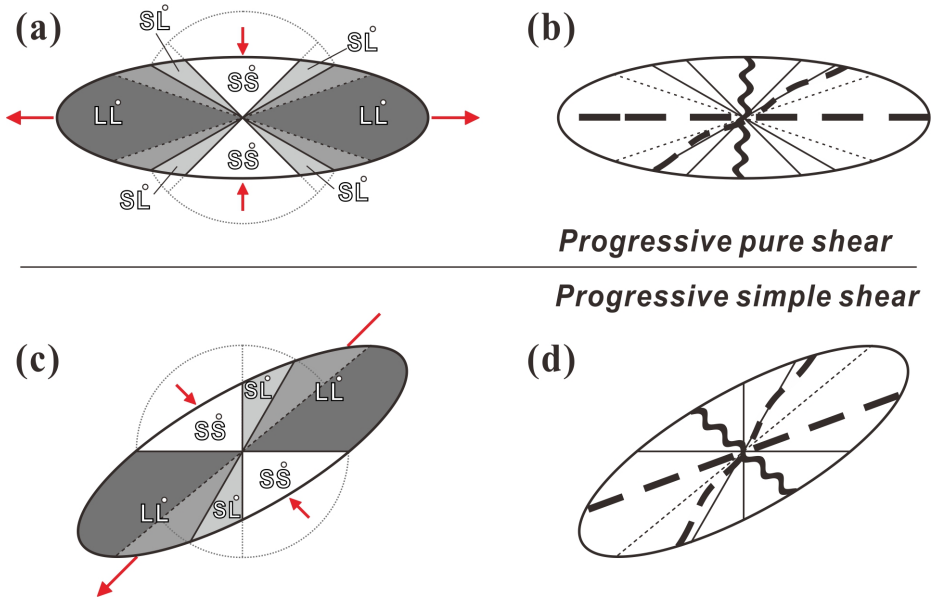


Fig. 7. Various deformation histories during progressive pure (a~b) and simple (c~d) shear (modified from Twiss and Moores, 2007). Note that both cases are end-members of steady-state deformation, which means no rotation of instantaneous strain axes. (a, c) Various sectors indicating different deformation histories. (b, d) Structures developed in competent layers within each sectors. There is no [LS] sector in both cases, and this indicates that any layers can NOT be folded boudin during the steady-state progressive deformation.

이 습곡작용을 받은 습곡된 부딘이다(Ramberg, 1952; Sengupta, 1983; Goscombe *et al.*, 2004; 그림 8c). 그러나 유사한 기하학적 형태가 부딘된 습곡에서도 관찰될 수 있으므로 변형이력 해석에 있어 상당한 주의가 요구된다. 또한 각 부딘들이 분리된 간격이 넓은 경우, 일반적으로 부딘된 지층이 전체적으로 습곡되기 보다는 기와지붕과 같이 부딘들이 서로 포개져 있는 발달형태를 보이는 것으로 알려져 있다(Sengupta, 1983; Passchier *et al.*, 1990; Price and Cosgrove, 1990; 그림 8d). 다만 비안정상태에서의 점진적인 전단운동(즉, 신장영역에서 수축영역으로의 회전) 또는 이미 존재하고 있는 부딘이 없이도 습곡작용이나 전단운동 중 역전된 지층의 계속적인 가늘어짐에 의해서도 유사한 형태가 관찰될 수 있으므로, 변형이론의 추론에 있어서 주의해야 한다(Passchier *et al.*, 1990; Swanson, 1999; Lee and Phillips, 2008).

이번 연구에서는 다단계변형에 의한 습곡된 부딘

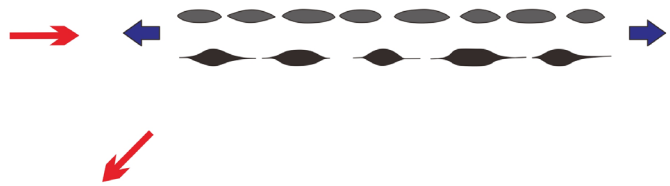
에 대한 보다 공통적이고 특징적인 발달특성을 확인하였다(그림 3, 4, 5). 특히 습곡의 힌지대와 날개부에서 차별적인 발달특성이 확인되었으며, 이를 요약하여 그림 8e에 나타내었다. 힌지대에서는 부딘 자체가 휘어진 반면 날개부에서는 부딘이 포개진 형태를 보이며, 포개진 방향이나 일부 회전된 부딘 등은 날개부를 따른 전단운동을 지시한다. 또한 이러한 전단운동의 운동감각은 습곡측면을 기준으로 대칭적으로 나타난다. 이러한 습곡된 부딘의 복합적인 특성은 부딘된 습곡 또는 다른 변형기작에 의한 응력변형과 뚜렷하게 구분되는 차별적인 특성으로 판단된다. 따라서 다단계변형에 의한 습곡된 부딘의 운동학적 특성을 포함한 변형이력의 추론에 있어, 앞서 언급한 이들의 기하학적 발달특성이 매우 중요하게 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

단, 비안정상태의 점진변형 동안에도 순수전단, 단순전단, 준단순전단 등이 복합적으로 작용할 수

(a) Undeformed



(b) Stage 1: Boudinage



(c~e) Stage 2: Folding

(c) *Folded boudin trains*



(d) *Rooftile or ramp-folded structures*



(e) *Hinge-folded & limb-stacked structures*

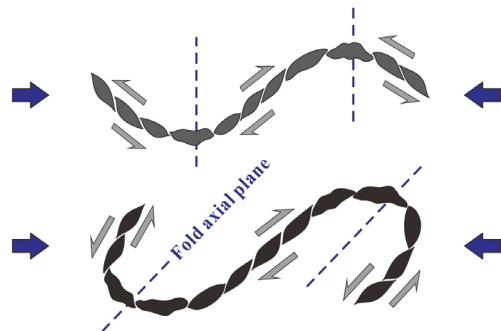


Fig. 8. Geometric and kinematic model for the folded boudin structures by polyphase deformation. (a) Undeformed two competent layers. (b) Boudin structures developed by layer-parallel extension during the first deformation phase. (c~e) Folded boudin structures developed by folding in second deformation phase, and their various patterns. Note that folded boudin trains (c) and rooftile or ramp-folded structures (d), reported by Goscombe *et al.*, 2004, can also be formed by non-steady-state progressive deformation or by different deformation mechanisms. Thus, hinge-folded & limb-stacked structures (e) can be the most obvious way to identify folded boudin structures associated with poly-phase deformation.

있기 때문에, 다단계변형에 의한 습곡된 부딘을 해석하고 추론하기 어려울 수 있다. 하나의 예로 습곡 작용 동안의 습곡 날개부에서는 층간 단층운동 또는 요굴미끌림(flexural-slip)에 의해 다단계변형으로 인한 습곡된 부딘과 유사한 형태의 응력변형이 관찰될 수 있다. 즉, 양쪽의 날개부에서는 습곡측면을 기준으로 서로 반대의 전단운동이 발생하며, 이로 인해 일부 암층 내에는 듀플렉스(duplex) 구조가 형성되기도 한다(Tanner, 1992; Horne and Culshaw, 2001). 그러나 이 경우 습곡작용 이전의 독립된 변형 사건에 의한 부딘구조가 관찰되지 않기 때문에 다단계변형에 의한 습곡된 부딘과의 구별이 가능하다. 따라서 보다 명확한 변형이력 해석을 위해서는 항상 주변의 다른 증거를 찾도록 노력해야 한다.

6. 결론

부딘과 습곡이 동시에 관찰되는 암석의 변형이력에 대해 알아보기 위해, 이들 두 지질구조가 동시에 관찰되는 단면노두와 전석에 대한 기하학적 분석을 실시하였다. 뿐만 아니라 점진변형 동안의 변형이력 모델을 바탕으로, 이들의 변형단계를 비롯한 운동학적 분석을 시도하였다.

이들 암석에 대한 기하학적 분석결과, 습곡의 날개부에서 각각의 부딘은 서로 포개져 있는 형태를 보인다는 점과 이를 통해 추론한 양쪽 날개부의 전단운동감각이 습곡측면을 기준으로 대칭적인 점, 그리고 힌지대에서는 각 부딘이 휘어진 점 등의 많은 형태적 특성들은 부딘이 형성된 이후 습곡작용이 있었음을 보여준다. 이는 기하학적 발달특성을 통해 이들 두 지질구조가 형성된 선후관계를 파악할 수 있음을 의미한다.

이러한 기하학적 분석결과를 바탕으로 변형이력 모델에 대해 검토하였으며, 습곡된 부딘의 운동학적 특성 또한 추론하였다. 그 결과 안정상태의 점진변형 모델에서는 기준선 또는 지층이 수축영역에서 신장영역으로 회전될 수 있으나, 그 반대는 발생하지 않기 때문에 습곡된 부딘은 점진변형이 아닌 다단계변형에 의해 형성된 것으로 판단된다. 마지막으로 다단계변형에 의한 습곡된 부딘의 특징적인 발달형태를 중심으로 부딘된 습곡과 습곡된 부딘의 기하학적 및 운동학적 특성을 비교 및 분석하였으며, 이를

통해 습곡된 부딘은 주로 습곡의 힌지대와 날개부에서 부딘이 특징적인 양상을 보임으로써 구별할 수 있음을 확인하였다.

이번 연구에서는 비교적 복잡한 형태의 다양한 지질구조가 발달된 암석에 대한 기하학적 분석을 통해 운동학적 특성을 추론하고자 하였다. 이를 통해 야외지질조사를 통한 정밀한 기재를 통해서도 변형된 암석의 변형이력에 대해 이해할 수 있음을 강조하고자 하였다. 결론적으로 이론적인 모델이나 다양한 분석방법에 앞서 기재적인 접근을 통한 기하학적 분석을 하는 것이 변형된 암석의 변형이력에 대한 추론과 해석에 매우 유용할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 책임저자에 대한 2013년 “부경대학교 자율창의연구 사업”의 지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사를 드린다. 또한 꼼꼼한 심사를 통하여 이 논문이 더욱 발전할 수 있도록 건설적인 조언을 아끼지 않으신 이희권, 고희재 두 심사위원님께서 진심으로 감사를 드린다.

REFERENCES

- Biot, M.A., 1961, Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implications in tectonics and orogenesis. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 1595-1620.
- Fossen, H., 2010, *Structural geology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ghosh, S.K. and Sengupta, S., 1999, Boudinage and composite boudinage in superimposed deformations and syntectonic migmatization. *Journal of Structural Geology* 21, 97-110.
- Goscombe, B.D., Passchier, C.W. and Hand, M., 2004, Boudinage classification: end-member boudin types and modified boudin structures. *Journal of Structural Geology*, 26, 739-763.
- Holst, T.B. and Fossen, H., 1987, Strain distribution in a fold in the West Norwegian Caledonides. *Journal of Structural Geology*, 9, 915-924.
- Horne, R. and Culshaw, N., 2001, Flexural-slip folding in the Meguma Group, Nova Scotia, Canada. *Journal of Structural Geology*, 23, 1631-1652.
- Hudleston, P.J. and Lan, L., 1993, Information from fold shapes. *Journal of Structural Geology*, 15, 253-264.

- Kim, B.K. and Park, B.K., 1966, Geological Map of Dongbok Sheet (1:50,000). Geological Survey of Korea.
- Lee, B.-J., 1992, Deformation related to dextral ductile strike-slip movement at the northern part of Hwasun coal field. *Journal of Geological Society of Korea*, 28, 40-51.
- Lee, J.R. and Phillips, E.R., 2008, Progressive soft sediment deformation within a subglacial shear zone - a hybrid mosaic - pervasive deformation model for Middle Pleistocene glaciotectionised sediments from eastern England, *Quaternary Science Reviews*, 27, 1350-1362.
- Marrett, R. and Peacock, D.C.P., 1999, Strain and stress. *Journal of Structural Geology*, 21, 1057-1063.
- Passchier, C.W., Myers, J.S. and Kroner, A., 1990, Field geology of high-grade gneiss terrains. Springer-Verlag, Berlin.
- Passchier, C.W., 1997, The fabric attractor. *Journal of Structural Geology*, 19, 113-127.
- Price, N.J. and Cosgrove, J.W., 1990, Analysis of geological structures. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ramberg, H., 1952, The Origin of Metamorphic and Metasomatic Rocks. University of Chicago Press, Chicago.
- Ramsay, J.G., 1967, Folding and fracturing of rocks, McGraw-Hill, New York.
- Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1987, The techniques of modern structural geology, Volume 2: Folds and fractures. Academic Press, London.
- Sengupta, S., 1983, Folding of boudinaged layers. *Journal of Structural Geology*, 5, 197-210.
- Smith, R.B., 1975, Unified theory of the onset of folding, boudinage, and mullion structures. *Geological Society of America Bulletin*, 86, 1601-1609.
- Swanson, M.T., 1999, Kinematic indicators for regional dextral shear along the Norumbega fault system in the Casco Bay area, coastal Maine. *Geological Society of America Special Paper* 331, 1-23.
- Tanner, P.W.G., 1992, Morphology and geometry of duplexes formed during flexural-slip folding. *Journal of Structural Geology*, 14, 1173-1192.
- Twiss, R.J. and Moores, E.M., 2007, Structural geology. W.H. Freeman, New York.

투 고 일 : 2013년 4월 8일

심 사 일 : 2013년 4월 11일

심사완료일 : 2013년 10월 31일