



미국 유타 아치스국립공원 내에 발달하는 아치형태의 분류와 발달원인 분석

김용형^{1,2} · 김영석^{1,*}

¹부경대학교 지구환경과학과

²경북대학교 지구시스템과학부 동해안지질공원사업단

요 약

모아브의 아치스국립공원에는 유타주의 상징인 델리커트아치(Delicate Arch)를 비롯하여 수천 개의 생성중이거나 풍화에 의해 소멸되고 있는 아치들이 발달하고 있다. 본 연구에서는 아치들의 주변에서 관찰되는 지질구조요소들이 아치의 형성과 형태의 변화에 어떠한 요인으로 작용하였는지에 초점을 맞추어 아치들을 분류하고 그 형성원인을 이해하고자 하였다. 분류를 위하여 아치가 발달하는 층의 위치에 따라 슬리크암층원(Slick Rock Member)을 하부, 중부, 그리고 상부로 나누어 분석하였다. 아치의 형태에 영향을 미친 지질요소는 크게 4가지로 구분되었다. 슬리크암층원의 하부에 발달한 아치는 듀이브릿지층원(Dewey Bridge Member)의 완만한 습곡에 의한 인장단열의 발달로 아치들이 형성된 것으로 해석되었으며, 슬리크암층원의 중부에서는 지하심부 암염동의 영향으로 발달한 습곡과 이에 수반된 암석지느러미(rock fins)뿐만 아니라 변형띠, 층리, 단열 등 다양한 요인이 복합적으로 작용하여 다양한 형태의 아치를 형성하였음이 밝혀졌다. 이 지역에 집중적으로 아치들이 발달하는 이유는 이 지역에 적당하게 변형을 받은 지층들이 적절한 높이로 융기하여 차별적인 풍화침식을 받았기 때문으로 판단된다.

주요어: 아치형태, 아치스국립공원, 유타, 엔트라다층, 지질구조요소

Yong Hyeong Kim and Young-Seog Kim, 2017, Categorization of the arches in the Arches National Park based on their shapes and interpretation of its developing mechanism. Journal of the Geological Society of Korea. v. 53, no. 5, p. 675-687

ABSTRACT: In Utah, various geological heritages such as deep canyons and geysers are developed, where also various arches, mainly associated with erosional processes, are developed around the Moab area. Thousands of arches, including the symbol of Utah, the Delicate Arch, are still developing or disappearing by erosion within the Arches National Park in Moab, Utah. In this study, first of all, we classified the arches to understand the formation mechanism and their controlling factors focusing on contribution of structural elements developed around the arches. The arches have been divided into three groups depending on their locations as lower, middle and upper Slick Rock Member. Four major geological elements that contributed to the formation of the arches are discussed. The arches developed in the lower Slick Rock Member were generated by tension fractures associated with gentle folding in the Dewey Bridge Member below the arches, whereas those in the middle of the slick Rock Member were formed by complex factors such as folding associated with the deep salt dome, rock fins, deformation bands, beddings and fractures. The reason why so many arches are developed in this park area is interpreted that properly deformed strata are properly uplifted in this area, and have experienced differential weathering and erosion to form arches.

Key words: arch shapes, Arches National Park, Utah, Entrada formation, geological structural elements

(Yong Hyeong Kim and Young-Seog Kim, Dept. of Earth & Environmental Sciences, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea; Yong Hyeong Kim, Donghaean Geotourism Agency, School of Earth System Sciences, Natural Sciences, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea)

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

1. 서론

미국 서부 유타지역에는 풍성기원의 사암 및 실트암으로 구성된 엔트라다층(Entrada Formation)이 분포하며, 이 층에는 고신생기 무렵 광역적인 압연 조구조운동과 관련된 정단층과 이에 수반된 습곡구조가 집중적으로 발달한다(e.g., Ogata *et al.*, 2014). 깊은 협곡과 간헐천 등 다양한 지질유산들이 발달하고 있는 유타주에는 풍화의 침식작용으로 생성된 다양한 아치들이 모아브(Moab) 지역을 중심으로 분포하

고 있다. 특히, 모아브지역의 아치스국립공원(Arches National Park)에서는 풍화의 결과로 만들어진 기이한 형태의 아치들이 많이 발달하고 있다. 공원의 전체 면적은 약 310.31 km²이며, 유타의 상징인 델리케트아치(Delicate Arch)를 포함한 약 2,000여개의 크고 작은 자연발생 아치들이 분포하고 있다(그림 1; Arches National Park Visitor Guide, 2016).

아치들은 1억년이라는 시간에 걸쳐 이 지역에서 발생한 지구조운동과 풍화침식작용의 영향을 받아 반복적인 생성과 소멸을 진행 중에 있다(e.g., Barnes,

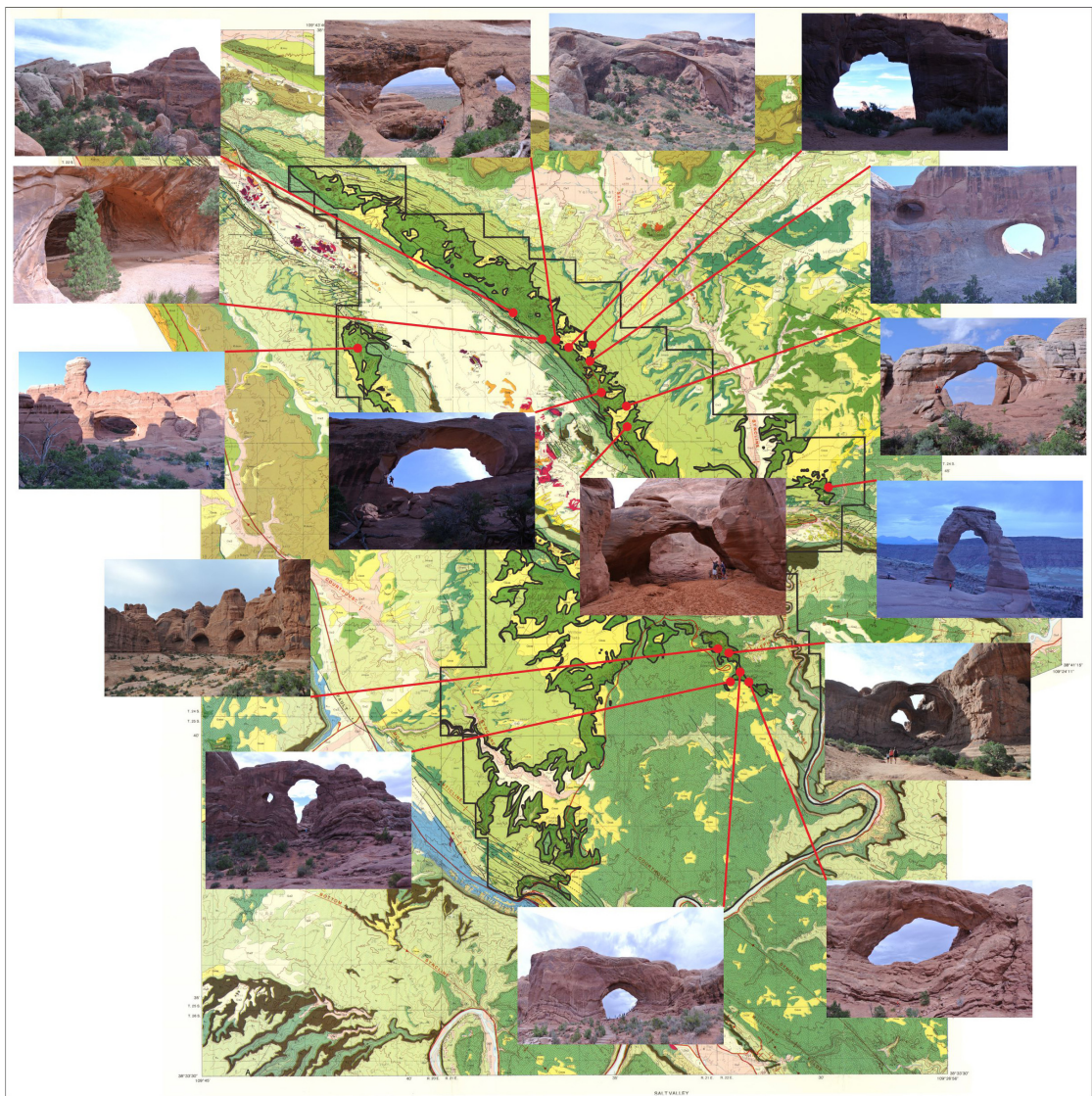


Fig. 1. Locations of various arches developed in the Arches National Park (modified from Doelling, 1985).

1978; Stevens and McCarrick, 1988). 연구지역에서 관찰되는 암상 내에 존재하는 물리적 불연속면인 절리의 발달은 아치가 집중적으로 발달할 수 있는 주요한 풍화 약대로 작용한다. 절리 이외에도 아치 주변에서 발달하고 있는 구조적 요소들은 습곡, 단층, 변형띠 그리고 층리가 있으며, 이들에 의한 차별침식 및 풍화작용에 의해 다양한 형태의 아치가 생성될 수 있다고 기존 연구에서(Kenneth and Atilla, 1994) 언급된 바 있으나, 이러한 아치들의 형성에 각 구조 요소들이 어떻게 영향을 미쳤는지에 대한 상세한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구지역에는 다른 주변의 지역과는 달리 많은 아치들이 집중적으로 발달하고 있어 이들의 형성 원인과 과정을 이해하는 것은 구조지질학적 의미뿐만 아니라 관광지질학적으로 매우 의미 있는 연구주제가 될 수 있을 것이다. 그러나 현재까지 연구된 내용은 일반적 패턴을 따르는 아치에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 각 지질요인들에 대해서는 간단한 언급과 가능성만 기재되어 있을 뿐 그 기여도가 상세히 연구되지 못하였다. 이는 이곳에서 발달하는 아치들의 다양한 생성요인들이 아직 명확히 분류되고 분석되지 못하였기 때문인 것으로 판단하였다. 실질적으로 아치스국립공원에 발달하는 다양한 아치들은 매우 다양한 발달과정을 보여주며, 다양한 요소들이 상호작용하여 형성된 것으로 조사과정 중에 밝혀져, 이번 연구를 통하여 이들에 대한 상세한 분류를 시도하고, 그 제어요인을 해석하고자 하였다.

따라서 이번 연구에서는 아치들의 주변에서 관찰된 지질구조요소들이 아치의 형성과 형태 변화에 있어 어떠한 요인으로 작용하는지에 대하여 다양한 방법으로 조사하였고, 관찰된 지질구조적 요소들이 구체적으로 아치의 형태에 어떻게 기여하였는지를 규명하고자 하였다. 이를 위해 아치들의 방향성과 아치가 발달하는 층준 및 그 주변에서 우세하게 관찰되는 지질구조요소들을 확인하고, 아치에서 얻을 수 있는 자료(높이, 폭, 형태, 생성방향 등)를 획득하였다. 측정된 자료를 바탕으로 하여 아치의 생성 및 형태변화를 규제할 수 있는 요인들을 분류하였다. 이번 연구는 아치의 생성부터 소멸에 이르는 진화에 대한 지질구조적인 접근을 통해 미국을 대표하는 지질관광자원 중 하나인 아치의 생성원인에 대한 새로운 해석을 제공할 수 있으며, 나아가 추후 우리나라에

발달하는 아치들의 해석에도 이러한 분석을 적용해 보고자 한다.

2. 미국 아치스국립공원 일대의 지질개요

미국 아치스국립공원은 지리적으로 미국 중서부 유타주의 남서쪽에 위치하며, 콜로라도고원(Colorado Plateau)의 파라독스 분지(Paradox Basin) 북서부 연변부에 해당하는 지역이다(그림 2; Doelling, 1985, 2004). 파라독스 분지는 해성층 및 풍성사구층으로 이루어진 퇴적암으로 구성되어 있고, 고신생기(Paleogene) 무렵 광역적으로 일어난 암염조구조운동(salt tectonics)과 관련된 정단층 및 이에 수반된 습곡구조가 현저하게 발달한다(Doelling, 1985; Dyer, 1988; Ogata *et al.*, 2014).

연구지역 일대에는 주라기 초기에 풍성퇴적된 나바호 사암(Navajo Sandstone)과 이를 부정합으로 피복하는 풍성기원의 적회색 사암 및 이암이 호층을 이루는 주라기 중기의 엔트라다층(Entranda Formation)이 광역적으로 분포하고 있다(그림 2, 3; Dyer, 1983, Doelling, 1985, 2001). 엔트라다층은 암체의 색상과 입도의 변화에 의해서 크게 3개의 층원(member)으로 구분되며, 하부로 부터 듀이브릿지층(Dewey Bridge Member), 스크암층원(Slick Rock Member), 그리고 모아브통층원(Moab Tongue Member)으로 구성된다(Doelling, 1985; 그림 3). 3개의 단위층 중 가장 하부에 위치하고 있는 듀이브릿지층원은 주로 검붉은색을 띠는 세립의 실트질 사암으로 이루어져 있고, 층후는 약 6-30 m 이다. 듀이브릿지층원의 상위에 정합적으로 놓여 있는 스크암층원은 다홍색을 띠는 괴상의 실트 내지 세립사암으로 이뤄져 있으며, 약 60-160 m의 층후를 갖는다. 엔트라다층의 최상부 층원에 해당하는 모아브통층원은 밝은 노란색에서 밝은 회색의 세립질 내지 중립질 사암으로 그 층후는 약 20-40 m로 알려져 있다(Doelling, 1985).

아치들이 위치하고 있는 솔트벨리배사구조(Salt Valley Anticline)는 과거 지하 심부에 존재하던 암염이 돔을 형성하면서 발생한 북서-남동 방향의 대규모 습곡에 의해 생성되었다. 이후 지하의 암염돔이 오랜 시간에 걸쳐 용해됨에 따라 습곡의 힌지에 해당하는 부분부터 진행된 지반의 침하는 습곡축에 평행한 정단층을 만들었고, 이로 인해 생성된 함몰대는 풍화에

의해 점차 현재의 지형을 이루게 되었다(Doelling, 1985). 남은 양쪽 날개부분에는 쏘트벨리배사구조와 연관된 습곡축과 평행한 북서-남동으로 주향하는 단열들이 광역적으로 발달한다(Lorenz and Cooper, 2001; Ogata *et al.*, 2014).

암염돔의 용해로 인한 불규칙한 지반침강으로 발달한 정단층들과 기존단열들로 인해 상대적으로 단열이 집중된 부분들이 풍화작용에 의해 삭박되어 나감에 따라 남은 고립 암체들을 암석지느러미(Rock Fin)라 한다(Kenneth and Atilla, 1994). 암석지느러미들은 쏘트벨리배사구조의 습곡축과 평행 내지 아평행한 방향으로 배열해 있으며, 그 폭은 수m 정도를 가진다. 암석지느러미들의 단열면들에는 특징적으로 그 벽면을 따라 해클(hackle), 프린지(fringe) 등의 깃털구조(plumose structure)가 발달해 있어 이들의 형성이 취성의 단열작용과 관련되어 있음을 시사한다(Hodgson, 1961, Pollard and Aydin 1988, Kenneth and Atilla, 1994).

아치스국립공원의 아치들은 대부분 주라기 엔트라다층에 속하는 괴상의 사암층인 슬리크암층원에 위치하는 것으로 알려져 있고, 쏘트벨리배사구조의 양쪽 날개(limb)부분에 분포하는 암석지느러미에서 주로 관찰된다(Doelling, 1985). 아치 생성기작에 대해서는 암상의 물리적 특성차이 및 암체 내에서 발달하는 인장단열의 패턴 등이 차별침식 및 풍화작용에 대한 물리적인 약대로 작용할 수 있다고 보고된 바 있다(e.g., Doelling, 1985; Kenneth and Atilla, 1994).

3. 자료의 수집

아치스국립공원에 존재하는 2000개 이상의 아치들 중 접근이 용이한 주요 아치(그림 2) 22개를 선정하고 이들 선정된 아치들을 발달하는 층서학적 위치에 따라 분류하였다. 아치들은 크게 1) 듀이브릿지층원과 슬리크암층원의 경계부분에 발달하는 아치, 2) 슬리크암층원의 중심부에 발달하는 아치로 크게

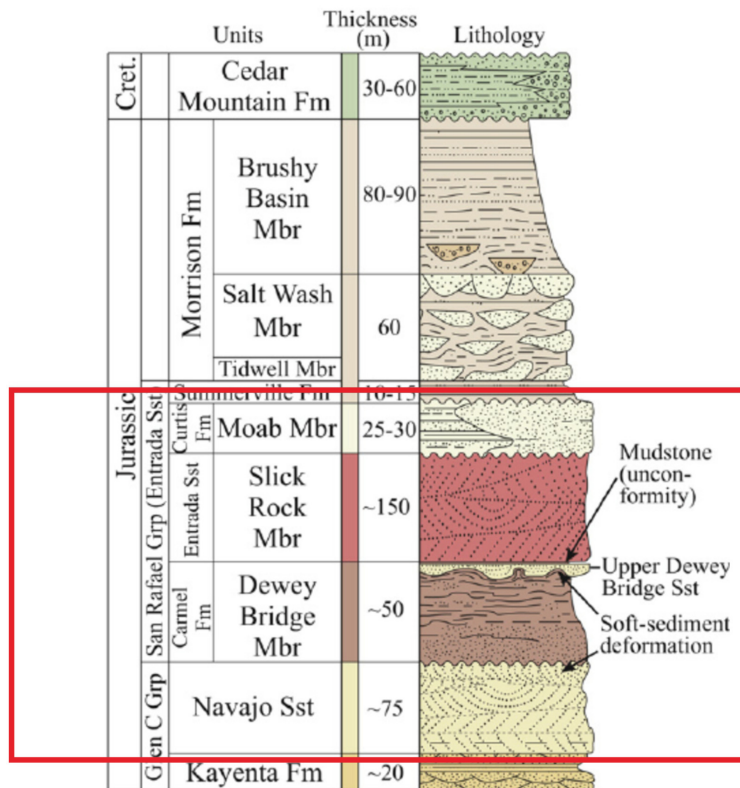


Fig. 3. Stratigraphic column of the study area (modified from Doelling and Morgan, 2000). The deformation, affecting to the formation of the arches, is localized within the marked box, which is exposed in the study area.

두 그룹으로 구분할 수 있다. 각각의 그룹에 따른 암석학적, 지질구조적 요소들을 야외조사로 획득하고, 이들과 아치의 상관관계에 대한 해석을 시도하였다. 기본적으로 아치의 발달특성을 이해하기 위해 아치의 위치, 높이, 폭, 구성암석 및 주변 지질구조들의 자세와 간격 등의 정보를 획득하였다. 접근이 어려운 아치에 대해서는 Leica사의 레이저거리측정기 DISTO D-510을 이용하여 높이와 폭을 측정하였다. 특히, 아치를 형성시킨 주요 원인을 분석하기 위하여 아치 주변에 발달하고 있는 1차 혹은 2차적으로 발달한 다양한 지질구조를 관찰하고 이들과 아치형성의 연관성을 추론하고자 하였다.

4. 아치들의 발달위치에 따른 분류

아치가 발달하는데 있어 가장 기본적인 요인은 풍화와 침식이다. 풍화와 침식작용은 특히 층리, 절리, 단층, 벽개 등의 구조적 불연속면이 약대(weakness)로 작용하여 강하게 일어난다. 이 지역에서 잘 관찰되

는 다공질 사암에서 응력이 집중되면서 입자들의 배열이 달라지거나 파쇄가 발생하여 공극의 변화가 생기는 구조를 변형띠(deformation band; e.g., Aydin and Johnson, 1978; Antonellini *et al.*, 1994)라고 하는데, 이렇게 형성된 변형띠에는 다양한 종류가 있지만 일반적으로 암체 내에서 풍화작용에 오히려 강해 그 외의 부분이 상대적으로 약대가 되어 침식되고 변형띠 부분이 남게 되는 효과를 나타낸다(e.g., Fossen *et al.*, 2015).

아치스국립공원에 집중적으로 발달하고 있는 아치들은 다양한 퇴적학적 또는 지질구조적 불연속면이 풍화에 강하거나 혹은 약한 경계로 작용하여 차별침식을 유발한 것으로 생각된다. 이러한 아치형성에 대한 일반적인 요인들 중 일부는 앞서 언급한 이전의 연구자들에 의해 이미 제안되었으나, 어떤 아치들이 어떤 요인들과 직접적으로 관련되었는지에 대한 명확한 규명이 이루어지지 않았다. 따라서 이번 연구를 통해 이러한 아치들의 형태를 분류하고 이와 관련된 요인들을 찾고자 하였다.

아치의 생성원인인 풍화의 약대로 작용한 지질구조를 규명하기 위해서는 특징적인 아치들의 그룹화가 필수적이다. 따라서 원인을 규명하기에 앞서 우리는 아치들의 형태적 분류를 시도하였으며, 이 과정에서 특징적인 아치들이 특정한 층서적 위치에 따라 발달하는 것을 알게 되었다. 이를 기초해 이들을 층에서의 위치에 따라 크게 두 개 그룹으로 나누고 이들 각 그룹의 특징에 대해 설명하고자 한다.

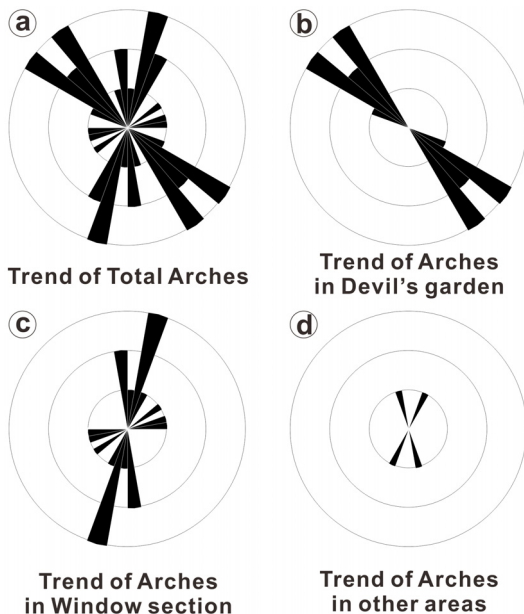


Fig. 4. Rose plots of arch orientations. (a) All arches. (b) Arches of the central part of the Slick Rock Member (generally Devil's Garden area). (c) Arches formed at the boundary between the Slick Rock Member and the Dewey Bridge Member (generally the Window Section). (d) Arches from all other studied arches (e.g., Tower Arch and Delicate Arch).

4.1 듀이브릿지층원과 슬리크암층원 경계에 발달하는 아치(N=12)

수 cm 내외의 비교적 얇은 층리를 갖는 세립 사암과 실트암으로 구성된 듀이브릿지층원과 그 상위에 세립 내지 중립질 사암이 과상으로 발달하는 슬리크암층원의 경계부에서 다수의 아치들이 관찰된다(그림 5). 이곳에 속하는 대표적인 아치들은 Double Arch, Turret Arch, Cove Arch, South Window Arch, North Window Arch 등이 있다(그림 1, 5).

이들은 특징적으로 아치스국립공원의 남동부에 집중적으로 분포하고 있다. 이 지역의 아치들은 N10°-20°E의 방향성이 가장 우세하게 발달하고 있으나 그 뒤를 이어 남북 및 북동방향으로도 우세하게 발달하고 있다(그림 4c). 이는 이 지역의 아치들이 쏘트벨리배사구조의 영향으로 발달된 북서방향의 암석지느러

미에 의한 영향으로 발달한 것이 아니라, 다른 구조적 요인에 의해 발달했음을 시사한다.

아치들의 형태는 대부분 높이와 폭의 길이가 유사한 양상을 보이고 있지만, 일부 아치들은 폭이 높이보다 넓은 납작한 모양을 보이거나, 반대로 높이가 높은 길쭉한 타원형을 이루기도 한다(그림 5). 따라서 이들 아치의 형태를 통계적으로 파악하고자 높이/폭(height/width)의 비율을 측정하였고, 이들이 아래 지층의 습곡과 연관이 있는지를 알아보기 위하여 아치의 익간각(interlimb angle)에 대해 도

시하였다(그림 5f). 대부분의 아치는 높이와 폭의 길이가 거의 비슷한 비율 1에 수렴하였으며, 이때 아치의 모양은 둥근 원과 유사하다(노란박스). 그러나 일부 아치는 높이가 매우 높거나 폭이 매우 넓은 형태로 발달하였으며, 높이가 높은 길쭉한 타원일수록 높이/폭의 비율이 1보다 높게 나타나며, 납작한 모양의 아치는 비율이 1보다 작게 나타난다.

아치의 형태와 익간각의 관계를 살펴보면 익간각이 상대적으로 작은(100° 내외) 부분에서 발달하는 아치일수록 길쭉한 형태로 발달한 아치가 많았다.

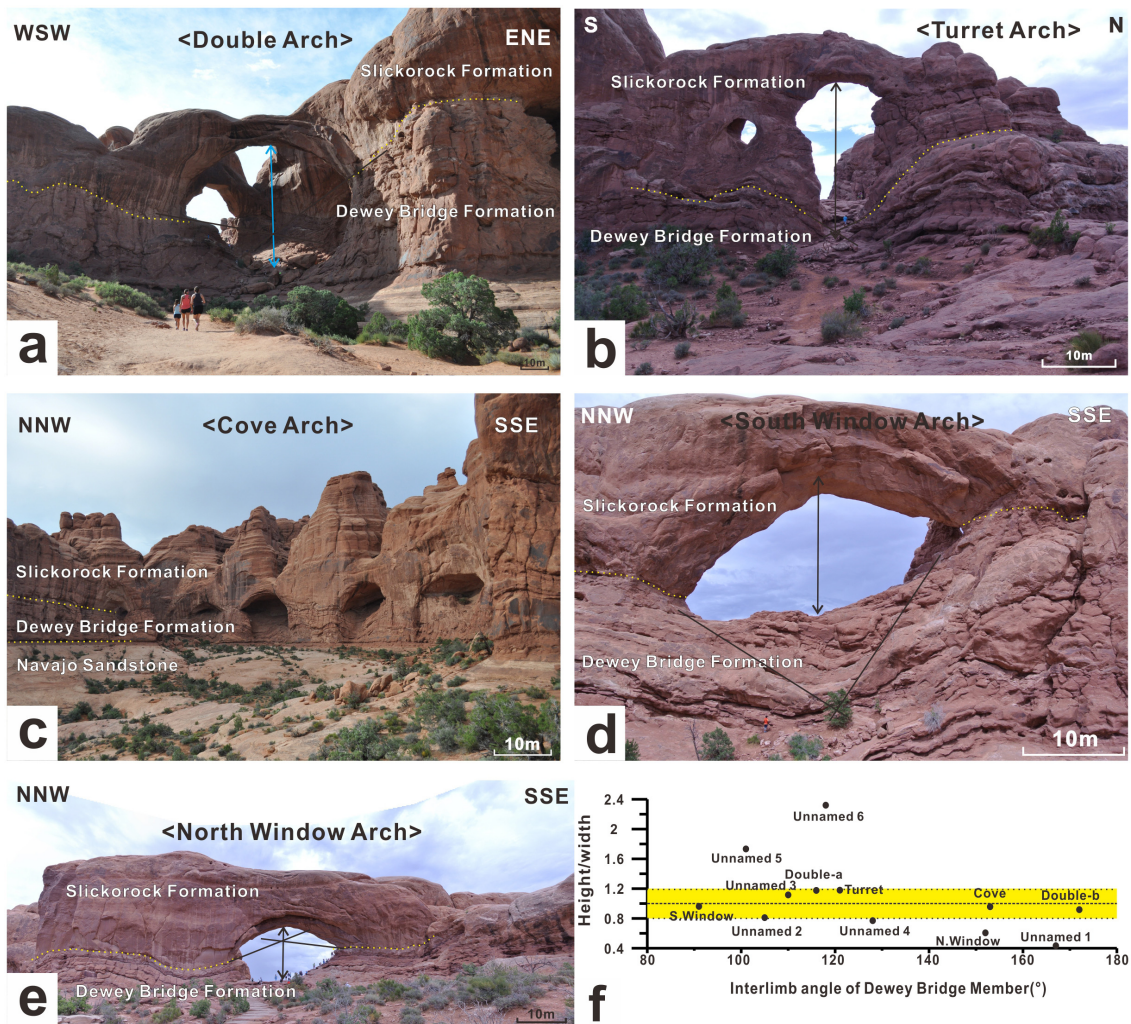


Fig. 5. Arches are located at the boundary between the Slick Rock Member and the Dewey Bridge Member in Window section. (a) Double Arch, (b) Turret Arch, (c) Cove Arch and unnamed arches, (d) South Window Arch, and (e) North Window Arch. These arches are located at the hinge of the folds in the Dewey Bridge Member. (f) Height-width ratios of each arch are plotted against the interlimb angle of the folds in Dewey Bridge Member, which indicates the relationship between arch shape and amount of folding (most of the arches plotted in the yellow box zone).

이는 듀이브릿지층원 습곡의 익간각이 좁을수록 아치가 높게 발달한 것으로 해석할 수 있으며, 이를 통해 하부 층원의 습곡작용이 아치의 발달과정에 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다. 아마도 이러한 형태는 두 층원의 경계부에서 두 층원의 물성차이에 영향을 받아 변형이 집중되어 형성된 습곡의 파장과 진폭에 의해 근본적으로 제어되며, 이후에 이들의 풍화와 침식 정도에 영향을 받아 아치의 형태가 결정된 것으로 판단된다.

4.2 슬리크암층원 중심부에 발달하는 아치(N=9)

괴상의 슬리크암층원의 중심부에 발달하는 아치들은 아치스국립공원의 북부에 집중적으로 분포하며, 악마의 정원(Devil's Garden)으로 불리는 곳에 집중적으로 분포하고 있다. 여기에 속하는 아치는 Partition Arch, Navajo Arch, Broken Arch, Skyline Arch, Double-O Arch, Pine Tree Arch 등이 있다(그림 1, 7).

암염동의 용해로 인해 발달한 함몰성 정단층 및 인장성 단열들을 수반한 습곡의 결과로 만들어진 북서 방향의 암석지느러미들은 수 ~ 수십 m의 폭을 가진다. 이 지역에서 관찰되는 대부분의 아치들은 암석지느러미들의 방향과 평행 혹은 아평행한 방향으로 발달하고 있다(그림 4b). 이는 암석지느러미 구조가 아치의 형성에 중요한 기여를 하였음을 지지하는 것으로 보인다. 즉, 암석지느러미 형태로 길쭉한 장방형의 판상으로 절단된 암괴들은 다른 지질구조들과 결합되면 풍화와 침식에 잘 노출될 수 있어 아치 형태를 형성시키기에 용이했을 것이다.

5. 토의: 아치형태의 생성기작과 규제요인

아치의 생성기작에 대해서 이전 연구자들은 대부분 단순한 차별침식에 의한 것으로 보았으며, 이를 규제하는 요인으로 암체에 존재하는 층리와 특정 부분에 집중된 전단단열에 의한 가능성을 제시한 바 있다(e.g., Doelling, 1985, Kenneth and Atilla, 1994). 이들이 아치의 생성에 있어서 중요한 기여를 할 수 있지만, 우리가 조사한 바에 의하면 이들은 아치의 형태를 좌우하는 여러 구조적인 요인들 중 일부에 불과하다. 이번 연구결과 위의 요인들 외에도 다양한 구조적 요인들이 아치의 발달에 영향을 미치고 있음이 밝혀졌는데, 예를 들면 습곡이나, 단열, 변형띠 등

을 들 수 있다.

아치의 생성기작은 위에서 언급한 바와 같이 차별침식 및 풍화작용이 가장 주요한 역할을 할 수 있지만, 이러한 풍화와 침식작용에 대한 차별화를 유발하는 것은 기존에 존재하는 층리(사층리 포함) 및 암체 내에 광역적으로 발달한 물리적인 약대인 절리 등의 불연속면들이 중요한 역할을 할 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 습곡과 단층 같은 2차적인 구조운동에 관련된 다양한 지질구조들 또한 아치 형성의 시작점이 될 수 있는 물리적인 약대로 작용할 수 있으며, 이와 반대로 변형띠와 같이 상대적으로 풍화에 강한 구조들은 아치의 생성과정에서 형태가 유지될 수 있도록 해주는 요인으로 작용할 수 있다.

이번 연구결과 다양한 아치의 크기(폭, 높이)와 장방형의 차이는 퇴적작용과 아치 형성과정에서 겪은 습곡작용과 같은 구조적 요인에 기인함이 밝혀졌다. 즉, 퇴적이나 구조적 작용으로 형성된 약대에서 차별침식 및 풍화작용이 시작되어 성장을 거쳐 붕괴로 이어지고 소멸에 이르는 전반적인 아치의 형성과 소멸 과정에서 그 형태적인 차이와 크기의 변화가 다양하게 나타날 수 있다. 또한 이번 연구를 통해 수집된 아치에 대한 다양한 분석결과는 아치의 형태와 크기의 차이가 아치가 생성된 부분에서 관찰되는 우세한 지질구조들의 특성을 강하게 반영함을 보여준다.

이 요인들은 아치가 갖는 특징을 나타내면서 발달하는데 아치의 생성에 있어서 이러한 각 요인들은 서로 별개로 작용하기 보다는 생성과정에서 서로 복합적이고 유기적으로 상호작용하는 것으로 해석된다. 따라서 아치들의 생성원인을 해석할 때에는 그 지역의 암상을 포함한 지질조건, 1차구조 그리고 2차구조 뿐만 아니라 그 지역에서의 변형특성을 이해하고 그 원인을 분석하는 것이 정확한 해석을 위해 필요함을 보여준다. 이러한 연구결과는 우리나라를 포함한 다른 지역에 발달한 아치들의 생성원인을 이해하는 데에도 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

이 지역의 아치는 대부분 기본적으로는 바람과 물 등 물리적 풍화작용에 의해 형성된 기이한 구조이지만 이러한 풍화는 기존에 발달한 구조적 요인에 강하게 영향을 받으며 다양한 형태를 만든다. 따라서 이들 아치의 풍화약대로 작용한 구조적 규제요인들에 대해서 다시 크게 4가지로 구분하여 분류하고 그 각 특징들에 대해 기술하였다.

5.1 습곡(fold)에 의한 규제

듀이브릿지층원의 최상위에는 세립사암과 실트암이 얇은 엽층리로 수 cm 두께의 층리를 가지며 교호하고, 익간각이 완만한 완만습곡(gentle fold)이 발달하고 있다(그림 5). 듀이브릿지층원의 상부 층원인 슬리크암층원은 괴상의 사암으로 구성되어 있으며, 이 경계부에서 다수의 아치들이 발달하고 있다. 이곳에 속하는 아치들은 Double Arch, Turret Arch, Cove Arch, South Window Arch, North Window Arch 등이 있으며, 이들은 아치스국립공원의 남부에 집중적으로 분포하고, 아치들의 방향성은 남북 내지 북동-남서 그리고 동북동-서남서 방향으로 발달하고 있다(그림 1, 4c).

이 아치들의 발달특성을 살펴보면 특징적인 것이 아치의 천정부 혹은 중심부가 아래의 듀이브릿지층원에 발달한 습곡의 힌지부분에 수직한 위치에 형성되어 있다(그림 5). 듀이브릿지층원의 습곡과 아치의 상관관계를 도출하고자 아치의 모양과 습곡의 익간각을 도식하여 비교하였다(그림 5f). 대부분의 아치들은 높이/폭 비율이 거의 1에 수렴하고 있으나, 익간각이 상대적으로 작은(100° 내외) 아치일수록 높이/폭 비율이 높아지는 길쭉한 형태로 발달하는 경향을 보이는데, 이는 하부 층원의 습곡작용이 아치의 발달과정에 영향을 미친 것으로 해석할 수 있다.

아치 하부에 위치한 듀이브릿지층원에서 측정된 층리는 대부분 5° 에서 42° 사이의 경사를 가지며, 주향은 거의 모든 방향으로 발달한다(그림 6). 이러한 층리자세는 일정한 횡압력에 의한 습곡작용을 지시하는 것이라기보다는 심부의 암염지체구조운동에 의한 유동에 따른 불규칙한 습곡작용을 지시하는 것으로 보인다. 아치 아래 듀이브릿지층원의 층리 자세를

스테레오넷에 도시한 결과 각 아치마다 차이는 있지만 습곡축이 두 방향으로 발달하며, 이들은 서로 수직한 방향으로 발달하는 경향을 볼 수 있다(그림 6).

Double Arch는 북북동-남남서 방향과 동북동-서남서 방향으로 발달한 두 아치가 붙어있는 양상을 보인다. 거의 수직한 방향으로 발달한 두 아치 주변에서 측정된 층리의 자세로부터 남서 방향으로 경사하는 습곡축과 남동 방향으로 경사하는 습곡축 등 두 개의 습곡축이 인지된다(그림 6a). 또한 북동-남서 내지 북서-남동으로 발달하는 두 절리군이 발달하는데, 이 절리들은 습곡축의 방향과 대체로 일치한다. 하지만 아치가 발달한 방향과 절리군의 방향은 약간 차이를 보인다. Turret Arch의 π 면은 남-북 방향 및 동북동-서남서 방향으로 발달하는데, 단열군은 북서 방향으로 주로 관찰된다(그림 6b). 아치의 방향은 남-북 방향으로 π 면 중 하나와 대체로 일치하는 경향성을 보이고 있다.

South Window Arch의 π 면은 북동-남서 내지 북서-남동 두 방향으로 서로 수직하게 발달하고 있다(그림 6c). 이 π 면과 평행한 방향으로 단열군이 관찰되며, 아치의 방향도 북동-남서 방향을 보여준다. North Window Arch는 대체적으로 π 면이 북북동-남남서 및 북서-남동 방향으로 발달하고 있으며, 세 방향의 단열군이 관찰된다(그림 6d; 북북서-남남동의 고각 및 저각 단열군, 그리고 북동-남서 내지 동북동-서남서 방향의 단열군). 아치의 방향은 동북동-서남서의 방향성을 보여준다.

일부 아치는 약간의 차이를 보이지만 습곡축의 π 면과 대체로 비슷한 방향으로 아치가 발달하고 있으며, 습곡의 힌지부와 아치의 천정부가 일치하는 점, 그리고 아치의 익간각이 좁아짐에 따라 아치의 모양

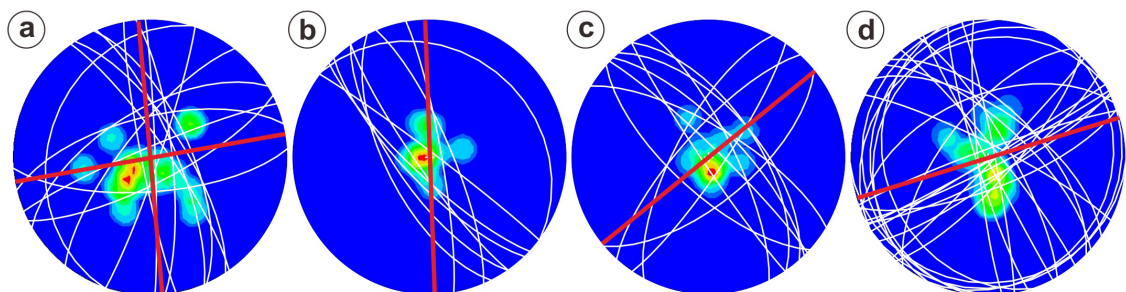


Fig. 6. Pole density of the beddings (contour) and fractures (white line) from Dewey Bridge Member. (a) Double arch, (b) Turret arch, (c) South Window Arch, and (d) North Window Arch. Red line shows the trend of each arch.

이 길쭉한 모양으로 발달하는 점 등으로 비추어 볼 때 듀이브릿지층원과 슬리크암층원 경계부에 발달하는 아치는 듀이브릿지층원의 습곡작용에 따른 영향이 큰 것으로 해석된다. 이를 근거로 판단할 때 하부의 습곡에 따라 응력이 집중되는 힌지부의 바로 상위에 놓여있는 괴상의 상대적으로 취성인 사암에 영향을 주어 습곡축면과 평행한 인장단열이 발생하게 되고, 이 단열들이 풍화의 약대로 작용하여 풍화침식이 진행되어 아치를 형성했을 것으로 해석된다(그림 8).

5.2 전단단열(shear fracture)에 의한 규제

슬리크암층원의 중심부에 발달하는 아치는 Partition Arch, Navajo Arch, Broken Arch, Skyline Arch,

Double-O Arch, Pine Tree Arch를 비롯하여 악마의 정원으로 불리는 아치스국립공원의 중부지역에 널리 분포하고 있다(그림 1). 이 지역에서는 북서-남동 방향으로 발달하는 쏘트벨리배사구조 발달작용과 관련된 암석지느러미들이 광역적으로 관찰된다.

이 지역에서 관찰되는 아치들의 방향은 대부분 북서 방향으로 발달하고 있다(그림 4b). 이 지역에 분포하는 아치들은 앞서 듀이브릿지층원과 슬리크암층원의 경계부에 발달한 아치들과는 달리 내호면의 굴곡이 부드럽지 못하고 각진 모양으로 발달하고 있다. 또한 아치 주변에 암석지느러미의 방향과 약 30° 내외의 주향차이를 보이는 단열들이 대칭적으로 발달하고 있는데, 이들은 북서방향의 단열에 달라붙는

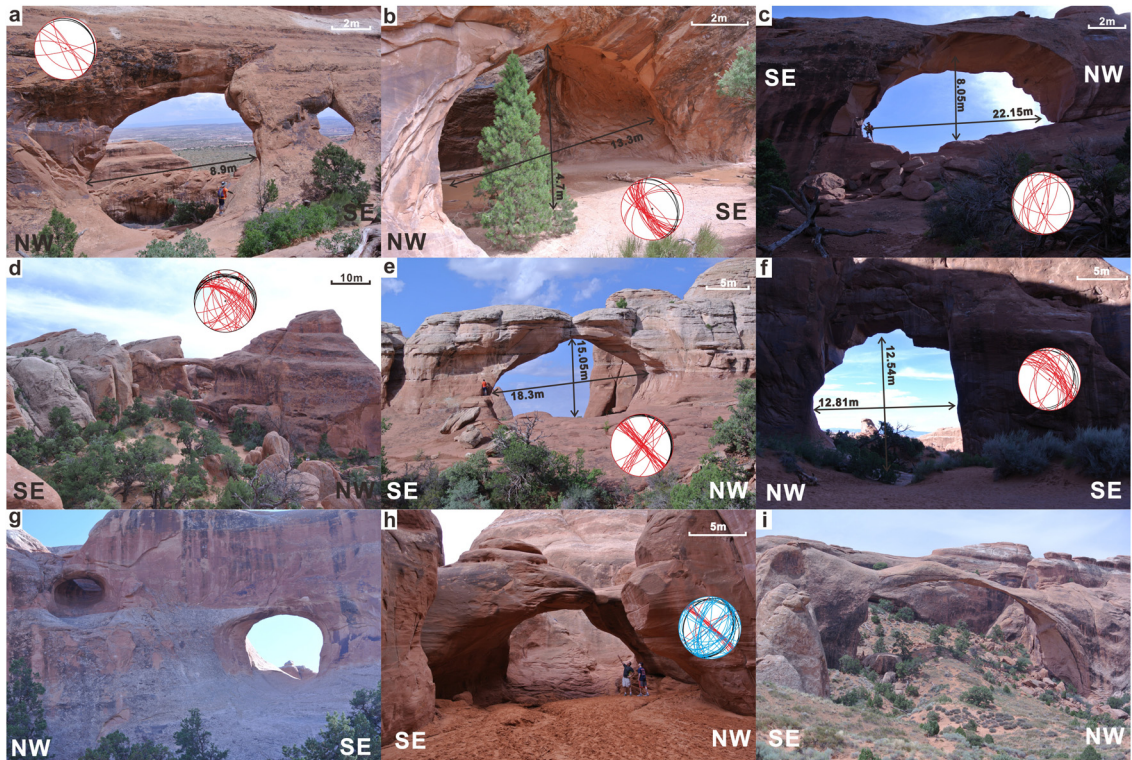


Fig. 7. Various arches located in the Devil's Garden area. Trends of almost all the arches show NW direction. The stereonets show bedding (black lines), fractures (red lines), and deformation bands (blue lines). Partition Arch (a), Navajo Arch (b), and Broken Arch (e) show perpendicular fracture patterns and arch parallel bedding. It means that bedding-fracture relationship is an important controlling factor in the formation of these arches. Skyline Arch (c), Double-O Arch (d), and Pine Tree Arch (f) have some fractures which are parallel to the main trend of the arches (NW direction) and another set of fractures (30° different from main trend). They may be secondary fractures related to shearing process. We could not approach Tunnel Arch (g) and Landscape Arch (i) due to safety concerns. Sand Dune Arch (h) has different properties to other arches. This sand dune layer has a high angle of cross bedding and some deformation bands and joints. Joints are almost parallel to the main trend of rock fins, and another set of joints are perpendicular to this.

양상을 보인다. 이러한 양상으로 보아 북서-남동 주향의 단열군에 30° 내외의 주향차이를 보이는 단열들은 전단에 의한 이차단열로 해석된다(그림 7). 이는 대규모 습곡작용에 의해 발달하는 인장력에 의해 생성된 암석지느러미들이 인장뿐만 아니라 이후에 계속적으로 작용한 습곡작용에 의해 약간의 전단작용을 함께 받으며 전단단열로 발달하고 그 부분이 약대로 작용하여 아치가 형성되었을 것으로 추정된다.

슬리크암층원 중심부에 발달하는 아치는 아치스 국립공원 중부지역인 이른바 Devil's Garden 구역에서 대부분 관찰된다. 이 구역에서 관찰되는 층리의 방향은 일관되게 북서 주향 내지 서북서 주향에 저각을 보인다(그림 7). 이는 앞서 관찰한 듀이브릿지층원에서의 다양한 방향을 갖는 층리들과 다른 양상을 보인다. 얇은 엽층리 내지 수cm 내외의 층리가 발달하며, 구성암석도 세립의 사암에서 실트암 정도의 입도를 보이는 듀이브릿지층원과 달리 세립에서 중립질의 과사사암으로 구성된 슬리크암층원의 특징이 반영된 것으로 해석된다.

내호면의 모양은 슬리크암층원의 하부에서 발달하는 아치들과 달리 각진 양상을 보이고 있다. 이 지역에서는 크게 북서-남동 방향 및 북동-남서 방향의 두 단열군이 서로 수직 내지 수직하게 발달하고 있다. 북서-남동 방향으로 발달하는 고각의 단열군과 저각의 층리가 상호작용을 하면서 이에 수직한 방향인 북동-남서 방향으로 주향하고 고각을 가지는 단열군에 의해 풍화가 진행되면서 탈락하여 이러한 양상을 보인 것으로 추정된다.

5.3 변형띠(deformation band)에 의한 규제

Sand Dune Arch는 슬리크암층원의 중심부에서

발달하고 있으나 단열의 발달보다는 변형띠의 발달이 두드러진다. 풍성기원의 사층리가 발달하는 중립질 내지 세립질의 사암으로 이루어진 Sand Dune Arch는 변형띠의 방향이 아치 내호면과 같은 방향을 보이는 곳이 많다(그림 7h). 야외관찰 결과 이 아치의 내호면은 다른 주변부분보다 더 단단하고 치밀한 조직인 변형띠로 구성된 것으로 판단되었다. 따라서 Sand Dune Arch의 기하를 형성한 주요한 요인은 상대적으로 치밀해진 변형띠가 풍화에 강해 이를 제외한 부분이 풍화되면서 아치를 형성한 것으로 추정하였다.

5.4 지층의 차별적 풍화(weathering) 및 침식(erosion)에 의한 규제

아치의 형성에 무엇보다도 가장 중요한 기작은 차별적인 풍화와 침식작용이다. 그러나 이들이 차별적인 풍화와 침식을 겪기 위해서는 근본적으로 지층별 또는 구조에 의해 서로 다른 풍화 및 침식 특성을 보여야 한다. 이러한 차별적인 특성은 퇴적과정에서 형성된 지층들의 고유한 물리적 특성과 1차 또는 2차적으로 발달한 구조들이 이러한 차별성을 유도하는 경우에 발생할 것이다.

그러나 차별적인 침식만으로 이렇게 많은 아치가 특히 이 지역에만 이렇게 집중될 수 있을까? 하는 것은 여전한 의문으로 남는다. 우리는 이에 대한 가장 큰 원인을 적절한 지층들이 적절하게 노출된 것에 그 원인을 찾고 있다(그림 2, 3). 즉, 습곡구조 등 아치를 형성하기에 좋은 적절한 변형구조를 가진 지층이 잘 노출되어 있어야 하고, 아치의 윗부분에 해당하는 지층이 아래 부분에 해당하는 지층보다 풍화와 침식에 더욱 강해야 나타날 수 있다. 만약 위의 지층이 더 약하다면 아치의 모양으로 남아 있을 수 없기

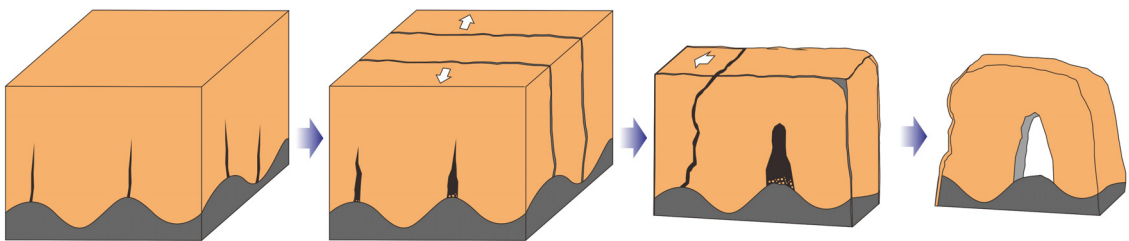


Fig. 8. Conceptual mechanical model showing a possible scenario of arch development in the Window section. Large scale joints create ribs in the Slick Rock Member. Perpendicular joints, created by local stress changes, are related to smaller scale salt related folding in the Dewey Bridge Member. They are translated as localized vertical fractures in the Slick Rock Member, which are later weathered to form arches.

때문이다.

이러한 양상은 유타지역에서 자주 관찰되는 메사(mesa) 구조들의 존재에서도 잘 알 수 있는데, 일부의 지층들은 기원이나 퇴적물의 물성뿐만 아니라 상대적으로 고결된 정도가 다른 지층과 많은 차이가 있어 풍화에 대한 저항도에 많은 차이를 보인다(Easterbrook, 1999). 또한 습곡이나 단열 등의 영향범위에서 그 원인을 찾을 수도 있는데, 즉 아치의 덮개암은 이러한 습곡이나 단열이 끝나는 부분이라고 할 수 있다. 이러한 저항도의 차이를 유발하는 요인은 이외에도 여러 가지가 있을 수 있어 추후 추가적인 정밀연구가 필요할 것으로 판단된다.

결론적으로 이러한 특이한 많은 아치들의 존재와 형태는 1차적으로 또는 2차적으로 발달한 지질구조에 의해 형성된 퇴적암 내의 구조들이 지표에 노출되면서 차별적인 풍화와 침식에 대한 저항을 보이기 때문에 나타나는 현상으로 해석할 수 있을 것이다. 특히, 흥미로운 것은 이렇게 한 지역에 많은 아치들이 발달하고 있지만 이들을 형성시킨 지질구조들은 매우 다양하고 때로는 복합적으로 절묘하게 결합되어 있는 경우도 많이 있다. 특히, 유타의 상징인 Delicate Arch는 절리의 결합에 의해 형성된 암석지느러미에서 절리의 발달을 따라 진행된 아래로부터의 풍화와 침식의 영향을 강하게 받은 것으로 판단된다.

이러한 까다로운 조건에서 아치들이 형성됨에도 불구하고 이렇게 많고 다양한 아치들이 한 지역에 집중하여 발달 할 수 있었던 것은 이 지역에서 습곡 작용 및 단열작용을 비롯한 변형작용을 적절하게 받은 지층들이 적절하게 융기되어 노출되어 있기 때문으로 판단된다(그림 2, 3). 이러한 어려운 여러 조건들이 결합되어야 이러한 기이한 경관을 탄생시킬 수 있다는 것이 지질유산에 대해 더욱 경이로움을 자아내게 한다. 또한, 지질학자들이 이러한 지질학적 원리를 이해하고 일반인들에게 쉽게 이해시키는 것이 지질유산의 가치를 높이고 관광지질학의 의미를 높여주는 것이라 생각된다.

6. 결 론

기존 연구에 의하면 아치는 암염의 용해와 관련된 습곡작용으로 형성된 암석지느러미들이 아치 발달에 주요 요인으로 작용했다고 보고되었다. 하지만

세부적으로는 층리와 절리뿐만 아니라 소규모습곡, 단열, 변형띠 등의 지질구조요소가 제어요소로 작용하여 다양한 기하학적 특징을 보이는 아치들을 형성한 것으로 판단된다. 아치주변에서 나타나는 지질구조들에서 수집된 자료를 통해 아치주변에서 나타나는 지질구조적인 특징이 아치의 크기와 형태를 규제하는 요인으로 중요하게 작용했다는 것을 알 수 있다. 아치 형성 및 형태변화를 규제하는 우세한 지질구조 요인들은 습곡, 전단단열, 변형띠 그리고 풍화와 침식특성 등 4가지로 분류될 수 있다.

아치스국립공원에 발달하는 다양한 아치들을 분석한 결과 아치의 기본적인 생성기작인 선택적 풍화를 일으킬 수 있는 근본적인 지질구조적 요인으로 습곡, 단열, 변형띠가 있음을 알 수 있었다. 하지만 제시된 요소 이외에도 아치의 생성기작에 적용할 수 있는 요소들이 더 많고, 또한 하나의 요인뿐만 아니라 여러가지 요인들이 복합적으로 작용했을 것으로 판단되기 때문에 추후 더욱 다양한 지질학적 시각으로 접근해 볼 필요성이 있다. 아치에 대한 여러 지질학적 접근은 아치에 대한 흥미를 더 하는 요소가 될 수 있을 것으로 예상되며, 본 연구를 통한 아치 형성에 대한 구조지질학적 접근은 아치스국립공원이 갖는 아치들의 가치에 다양성을 부여해 줄 수 있을 것으로 판단된다. 또한 이러한 연구결과는 다른 지역에서의 아치형성과정을 이해하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 부경대학교 2016년 자율창의학술연구(과제번호: CD20160292)의 지원을 받아 이루어졌다. 이 논문에 대한 유익한 조언을 하여 주신 채병곤 박사님과 익명의 심사위원님께 감사를 드리며, 현장 자료의 수집과 자료처리를 도와준 김태형 군에게도 감사를 드린다.

REFERENCES

- Antonellini, M.A., Aydin, A. and Pollard, D.D., 1994, Microstructure of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*, 16(7), 941-959.
- Arches National Park Visitor Guide, 2016, <https://www.>

- nps.gov/arch/planyourvisit/upload/ARCH2016 VisitorGuideWeb.pdf (July 19, 2016).
- Aydin, A. and Johnson, A.M., 1978, Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstones. *Pure and Applied Geophysics*, 116, 931-942.
- Barnes, F.A., 1978, Canyon country geology: Salt Lake City, Utah. Wasatch Publishers, p. 160.
- Doelling, H.H., 1985, Geologic map of Arches National Park, with accompanying text. *Utah Geological and Mineralogical Survey Map*, 74, 15 p.
- Doelling, H.H., 1988, Geology of Salt Valley anticline and Arches National Park, Grand County, Utah, in Doelling, H.H., Oviatt, C.G. and Huntoon, P.W., eds., Salt deformation in the Paradox region. *Utah Geological and Mineralogical Survey Bulletin*, 122, 1-58.
- Doelling, H.H., 2001, Geologic map of the Moab and eastern part of the San Rafael Desert 30' × 60' quadrangle, Grand and Emery Counties, Utah, and Mesa County, Colorado. *Utah Geological Survey Map* 180, 3 plates, scale 1:100,000.
- Doelling, H.H., 2004, Geologic map of the La Sal 30' × 60' quadrangle, San Juan, Wayne, and Garfield Counties, Utah, and Montrose and San Miguel Counties, Colorado. *Utah Geological Survey Map* 205, scale 1:100,000.
- Doelling, H.H. and Morgan, C.D., 2000, Geologic map of the Merrimac Butte quadrangle, Grand Count, Utah. *Utah Geological Survey Map* 178, 22 p, 2 plates, scale 1:24,000.
- Dyer, J.R., 1983, Jointing in sandstones, Arches National Park, Utah. Ph.D. thesis, Stanford University, Stanford, California, USA.
- Dyer, J.R., 1988, Using joint interactions to estimate paleostress ratios. *Journal of Structural Geology*, 10, 685-699.
- Easterbrook, D.J., 1999, *Surface Processes and Landforms*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 546 p.
- Fossen, H., Zuluaga, L.F., Ballas, G., Soliva, R. and Rotevatn, A., 2015, Contractional deformation of porous sandstone: Insights from the Aztec Sandstone, SE Nevada, USA. *Journal of Structural Geology*, 74, 172-184.
- Hodgson, R.F., 1961, Regional study of jointing in Comb Ridge Navajo Mountain area, Arizona and Utah. *America Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 45, 1-38.
- Kenneth, M.C. and Atila, A., 1994, Role of fracture localization in arch formation, Arches National Park, Utah. *Geological Society of America Bulletin*, 106, 879-891.
- Lorenz, C.J. and Cooper, P.S., 2001, Interpreting Fracture Pattern in Sandstones Interbedded with Ductile Strata at the Salt Valley Anticline, Arches National Park, Utah. Utah State University.
- Ogata, K., Senger, K., Braathen, A. and Tveranger, J., 2014, Fracture corridors as seal-bypass systems in siliciclastic reservoir-cap rock successions: Field-based insights from the Jurassic Entrada Formation (SE Utah, USA). *Journal of Structural Geology*, 66, 162-187.
- Pollard, D.D. and Aydin, A., 1988, Progress in understanding jointing over the past century. *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1181-1204.
- Stevens, D.J. and McCarrick, J.E., 1988, The arches of Arches National Park, a comprehensive study. Moab, Utah, Mainstay Publishing. 169 p.

Received : March 17, 2017

Revised : July 4, 2017

Accepted : July 12, 2017