

미국 북서 네바다주 험볼트 산맥의 구조분석

정 상 원

미국 네바다 주립대학교

요 약 : 미국 네바다주 북서지역은 주요 구조층서적 지구대의 상대적 이동에서 특징적이며 복잡한 구조가 발달되었다. 본 연구지역은 삼첩기 초기의 코이파토 층군과 삼첩기 중기의 스타피크 층군의 현지성 암석으로 구성되며, 이들 현지성 암석은 미국 네바다 북서지역의 험볼트 산맥에 위치한다. 본 연구는 쥘라기에서 백악기 말기동안 작용한 변형작용의 역사 그리고 그와 관련된 조지의 발달 그리고 고응력상태의 분석에 역점을 두었다. 펜스메이커 타지성 암석은 험볼트 산맥의 현지성 암석위로 E에서 ESE 방향으로 오우버 드러스트함에 따라 현지성 암석에 다변형작용을 보여준다. 이러한 중생대 전지 변형작용에 관련된 구조는 N나 NNE 방향으로 잘 발달된 엽리구조, 서로 다른 습곡형태, 소규모의 드러스트, 전위 엽리의 발달 그리고 강력한 압쇄작용을 들 수 있다. 이들 구조는 험볼트 산맥의 서쪽 경계부를 따라 발달되었으며 미국 북서 네바다 지역에서의 최초 전지 변형작용 알려져 있다. 광역 주 압축응력(σ_1)은 여러 가지 D_1 구조의 방향에 근거하여 E나 ESE 방향으로 밝혀졌다. 백악기 중기와 말기의 변형작용은 일정하게 배열된 N나 NNE 방향으로 주향하는 변성 석영맥과 기존에 발달된 D_1 엽리구조에 평행한 전단대를 들 수 있다. 변성 석영맥의 일정한 방향성과 이와 관련된 구조는 백악기 중기와 말기의 본 연구 지역에 가해진 광역 주 응력 방향으로 해석되었다. 전단대의 전단감각은 우수 전단 방향으로서 이전에 형성된 D_1 구조의 재활동에 근거한다. 이러한 결과는 쥘라기로부터 백악기 말기까지 연구지역에 작용한 광역 주 응력이 시계 반대 방향으로 회전되었음을 반영한다. 마지막으로, 전단면 벽개와 S/C 압쇄조지의 발달은 연구지역에서의 전단대가 불균질 단순 전단 작용을 받았음을 나타내며 또한 압쇄암 형성시 단축 작용 동안 비동축류의 지대로서 작용했음을 나타낸다.

핵심어 : 험볼트 산맥, 펜스메이커 드러스트, 전위 엽리, 압쇄암, 광역 주 압축응력

서 언

미국 네바다주 북서 지역은 세가지 주요 구조층서적 테레인(tectonostratigraphic terrane)의 상대적 이동에 의해 특징적인 구조가 발달되었다: (1) 삼첩기 초의 코이파토 층군(Koipato Group)과 삼첩기 중기의 스타피크 층군(Star Peak Group)으로 구성된 현지성 암석(authochthonous rock), (2) 삼첩기 분지성층(basinal strata)으로 구성된 펜스메이커 타지성 암석 (Fencemaker allochthonous rock). (3) 고생대 중기에서 쥘라기 동안 발달된 호상열도와 관련된 타지성 블랙락 테레인(arc-related allochthonous Black Rock terrane).

본 연구는 앞서 언급한 세 테레인 중 코이파토 층군과 스타피크 층군으로 구성된 현지성 암석의 변형사(deformation history)와 조지의 발달에 연구 초점을 두었다(Fig. 1). 이들 현지성 암석은 미국 네바다주 북서 지역의 험볼트 산맥에 잘 나타나며, 펜스메이커 타지성 암석이 현지성 암석위로 오우버 드러스트하여 중생대 전지 변형작용(Mesozoic fore-

land deformation)을 일으켰다. Fig. 1은 연구지역과 미국 네바다 주변지역에 발달한 대 분지(Great Basin)의 지형학적 모식도이다.

본 연구 지역은 1850년 이후 귀금속의 탐사에 기인하여 많은 연구가 있었지만 지질 시대별 구조사에 대한 연구는 체계적으로 수행되지 않았다(Wallace and Tatlock, 1962; Silberling and Wallace, 1969; Wallace *et al.*, 1969a; Wallace *et al.*, 1969b; Vikre, 1981). 최근 들어 본 연구 지역은 연구 지역에서 산출되는 귀금속 광상의 기원과 퇴적환경, 그리고 미국 북서 네바다의 형성 과정에 대한 판구조학적 재고찰에 근거하여 구조사에 대한 체계적 연구가 수행된 바 있다(Speed, 1978a, 1978b; Oldow, 1983; Heck, 1987; Silberling, 1991). 하지만 구조사에 대한 대부분 연구는 주로 쥘라기의 변형작용에 역점을 두었지만, 미국 네바다 험볼트 지역에서 중생대 전지 변형작용에 기인한 총체적인 구조 발달과 백악기의 변형작용에 대한 연구는 미흡하다.

본 연구의 목적은 북서 네바다 험볼트 지역에 작용한 중생대 전지 변형 작용의 특성 즉 구조적 조

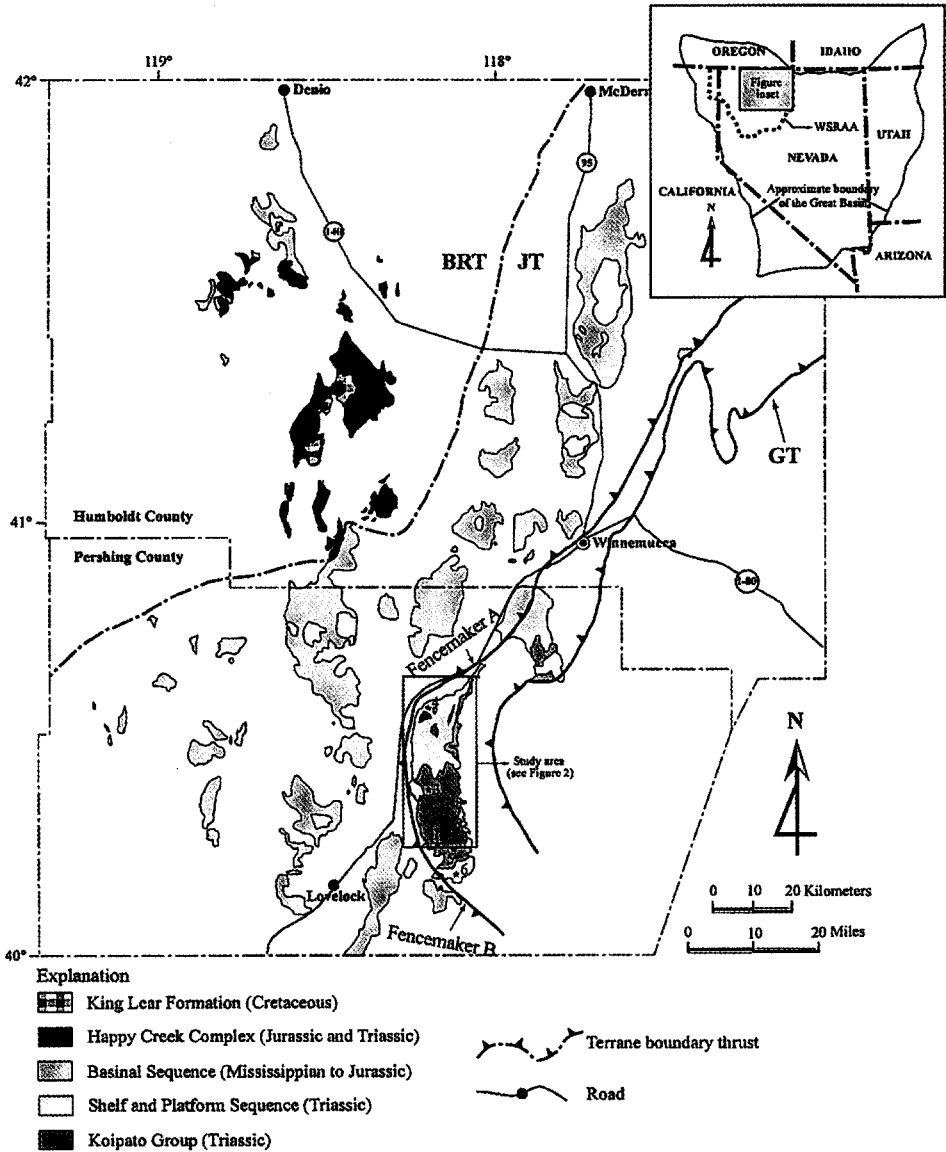


Fig. 1. Generalized map and three terranes showing study area, Winnemucca-Surprise Resource Assessment Area (WSRAA) defined by Peters *et al.* (1996) and the Great Basin in Nevada and adjacent area, U. S. A. See Table 1 for sample numbers of age data in study area. (BRT: Black Rock Terrane, JT: Jungo Terrane, FT: Fencemaker thrust, GT: Golconda thrust) (modified from Stewart and Carlson, 1978; Speed *et al.*, 1989).

직 발달, 구조사 그리고 고응력장의 연구에 근거하여 지질시대별 변형 특성을 밝히는데 있다. 이를 위해 펜스메이커 오우버 드러스트의 역학적 특성과 그로 인한 조지의 발달, 습곡, 소규모 드러스트, 암쇄암의 발달, 전위 엽리구조(transposed layering) 그리고 변성 석영맥(metamorphic quartz veins) 등의 상호관계를 주라기로부터 백악기 말기까지 조사하

였다. 본 연구의 변형 작용은 지질 시대별로 크게 2가지로 분류한다: (1) 주라기 변형작용 (2) 백악기 변형작용. 주라기 변형작용은 펜스메이커 드러스트의 영향으로 북서 네바다 험볼트 지역의 현지성 암석에 변형작용을 일으켰으며, 백악기 변형작용은 주라기 전지 변형작용으로 형성된 엽리 구조에 대체로 평행한 변성 석영맥을 형성시켰다. 이들 구조의

선후관계를 밝힘으로써 연구지역에 작용한 광역 주응력(σ_1) 방향을 쥬라기에서 백악기 초 그리고 백악기 중말기로 구분하여 미국 북서 네바다 험볼트 지역의 조구조 운동의 특성을 연구하였다.

지 질

본 연구 지역은 미국 북서 네바다에 위치하는 서로 다른 구조환경을 겪은 구조층서적 테레인의 남

동쪽에 위치하는 현지성 암석군(autochthonous rocks)으로 구성된다. 이들 테레인은 북서 방향에서 남동 방향으로 각각 1) 하부 삼첩기의 코이파토 층군과 스타피크 층군으로 구성된 현지성 암석군과 2) 삼첩기 중기의 타지성 분지 성층으로 이루어진 펜스메이커 또는 정고 테레인(Fencemaker or Jungo terrane), 그리고 3) 고생대 중기와 쥬라기의 호상열도와 관련된 타지성 암석군으로 구성된 블랙락 테레인으로 명명되고 있다(Fig. 1).

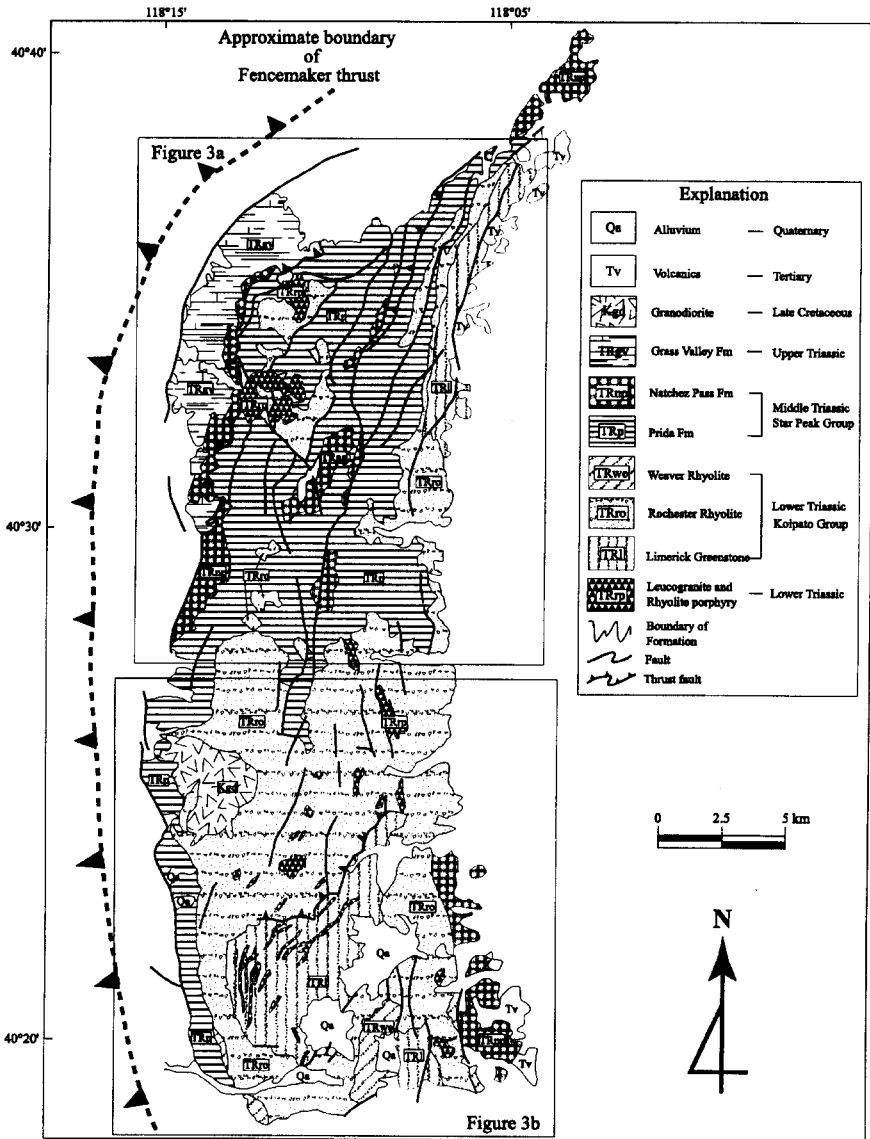


Fig. 2. Geologic map of the Humboldt Range, Pershing County, northwest Nevada, U.S.A. (modified from Silberling and Wallace, 1967; Wallace *et al.*, 1969b; Stewart and Carlson, 1978; Vikre, 1981).

본 연구지역은 삼척기 초기 및 중기의 현지성 암석군으로 코이파토 층군과 스타피크 층군으로 크게 구분되며 백악기 말기 화강섬록암의 관입이 있었으며 신생대 중신세(Miocene)에 미국 네바다 전역에 광범위하게 분출된 화산암이 연구지역의 주변에 소규모로 분포한다(Fig. 2).

코이파토 층군(Koipato Group)

코이파토 층군은 삼척기 초기의 현지성 암석군으로 약 2.7 km 두께의 변성 화산암으로 구성된다(Johnson, 1977; Stewart, 1980). 코이파토 층군은 주로 화산암질 또는 화산 쇄설암으로 구성되며 하부로부터 리머릭 그린스톤(Limerick Greenstone), 라체스터 유문암(Rochester Rhyolite) 그리고 위버 유문암(Weaver Rhyolite)으로 세분한다. 코이파토 층군은 고생대 말기 하발라 층군(Havallah Group) 위에 부정합으로 퇴적되었으며 본 연구 지역인 험볼트 지역(Humboldt Range)에서의 귀금속의 모양으로 널리 알려져 있다(Johnson, 1977; Stewart, 1980). 이 층군의 지질연대는 화석이나 총서, 저어콘의 휘선 트랙연대(Fission track age) 그리고 Rb/Sr 연대측정 등으로 삼척기 초기로 밝혀졌으며 해성 환경 하에서 분출된 변성 화산암류들이다(Silberling and Tozer, 1968; Wallace *et al.*, 1969a; McKee and Burke, 1972; Silberling, 1973).

스타 피크 층군(Star Peak Group)

삼척기 중기의 스타피크 층군은 현지성 분지성 층의 퇴적암으로 구성되며(Silberling and Wallace, 1967; Nichols and Silberling, 1977), 하부의 프리다 층(Prida Formation)과 상부의 나체스 패스 층(Natchez Pass Formation)으로 세분되며, 삼척기 말의 올드 랭 사인 층군(Auld Lang Syne Group)에 속하는 암석이 지역적으로 나타난다(Speed, 1978a, 1978b; Whitebread, 1994). 스타피크 층군은 코이파토 층군 위에 정합적으로 퇴적되었으며 석회암, 이암, 셰립질 사암, 석회질 셰일 등 불균질 암석으로 구성된다.

험볼트 지역에서의 스타피크 층군은 북미 지괴(North America Craton)의 서쪽 경계부를 따라 대륙 봉단과 플랫폼(platform) 환경 하에서 퇴적되었다(Nichols and Silberling, 1977; Doeblich, 1996). 이들 현지성 암석군(Koipato and Star Peak Groups)은 퇴적후 녹색 편암상으로 광역 변성 작용을 받았

으며 펜스메이커 드러스트(Fencemaker thrust)의 동쪽 경계부를 따라 심하게 변형되었다.

험볼트 산맥(Humboldt Range)의 구조

연구 지역인 험볼트 산맥은 D₁엽리 구조의 방향, 습곡구조의 형태와 강도, 압쇄 구조의 존재유무, 전단감각에서의 차이 등에 의해 두 지역으로 구분된다(Fig. 2): (1) 북부 험볼트 산맥 (2) 중서부 험볼트 산맥. 앞서 언급한 두 지역은 펜스메이커 드러스트의 주향에서의 변화와 이동 방향에 따라 각각 형성된 구조를 달리한다(Fig. 2, Fig. 3a, 3b).

험볼트 산맥에서의 펜스메이커 드러스트는 쥬라기 중기와 백악기 초기에 걸쳐 활동했으며(Heck, 1987; Elison and Speed, 1989), 북부 험볼트 지역에서는 북북동 방향에서 북동 방향으로 그리고 중서 험볼트 지역에서는 남북 방향의 일반적인 주향을 갖는다(Fig. 2). 펜스메이커 타지성 암석은 현지성 암석으로 구성된 험볼트 지역 위로 오우버 드러스트하여 이 드러스트에 인접한 치밀한 조직과 구조를 형성했다. 이 광역적 드러스트에 의해 형성된 구조는 치밀한 엽리구조, 여러 모양의 습곡구조, 그리고 광역적 드러스트와 관련된 소규모의 드러스트 등이며, 이들 소규모 드러스트는 펜스메이커 드러스트와 같은 주향을 갖는다. 이들 구조들은 펜스메이커 드러스트의 활동이 중단된 백악기초 이후의 변형 작용에 의해 서로 중첩된 구조를 보여준다.

연구 지역은 쥬라기로부터 백악기 말기까지 세번에 걸쳐 작용한 광역 변형 작용을 받았다(D₁, D₂, D₃). D₁ 그리고 D₂ 구조와 강한 조직 발달은 펜스메이커 타지성 암석의 구조적 이동 즉 E나 ESE 방향(Speed, 1978b; Elison, 1987; Heck, 1987)으로의 이동에 기인하며, 쥬라기 변형작용과 밀접하게 관련되어 있다. Fig. 4c의 신장 선구조의 방향은 측정자료가 불충분하지만, 미약하나마 구조적 이동방향(E나 ESE 방향)을 인지할 수 있다. 반면 D₃ 구조와 조직의 발달은 백악기 중기와 말기의 변성 석영맥의 형성과 발달에 관련된다.

변형사와 조직의 발달

현지성 암석으로 구성된 험볼트 산맥은 여러 차례의 변형작용을 받았다. 이 지역의 변형작용은 험볼트 산맥의 서쪽 경계를 따라 가장 특이하며, 이것은 쥬라기 중기와 백악기 초기에 발달된 펜스메이커 타지성 암석이 초기 삼척기 암석인 코이파토

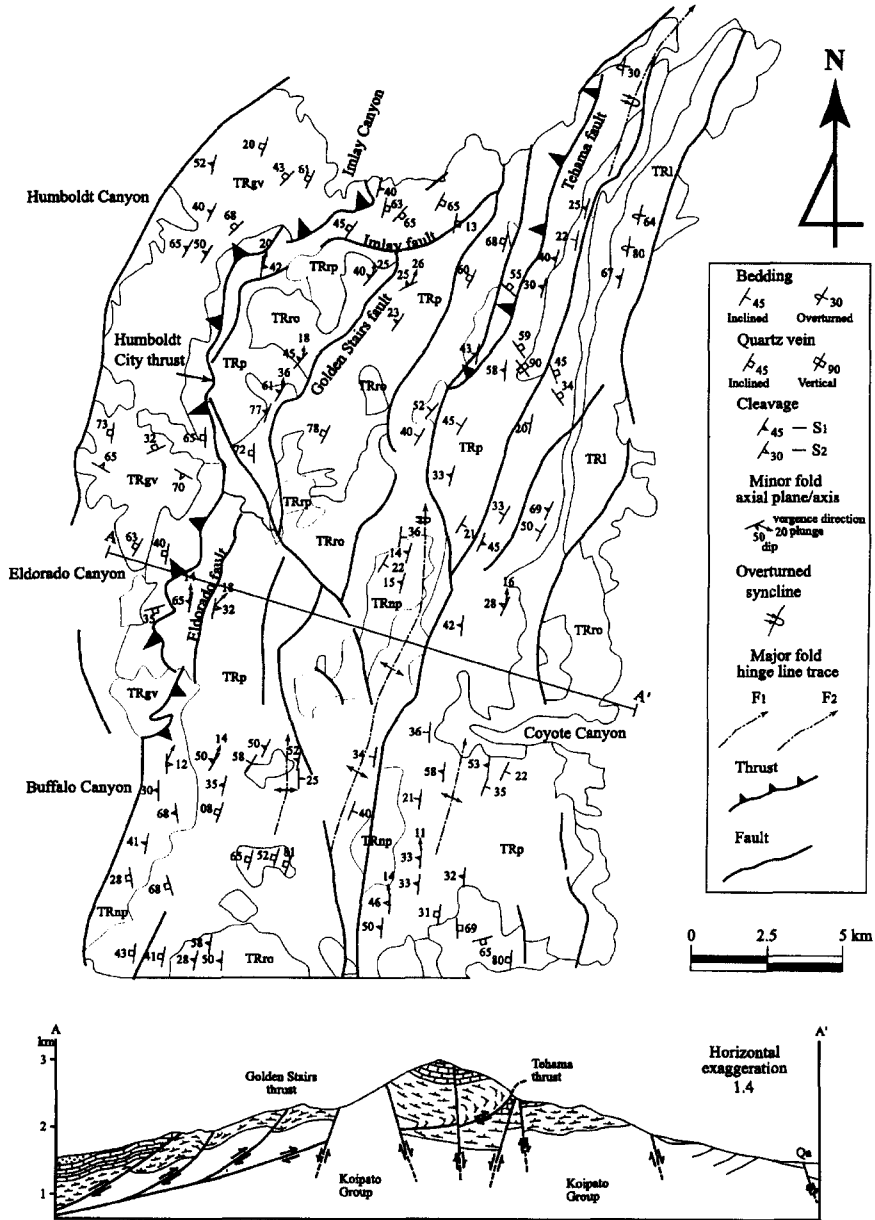


Fig. 3a. Structural map of the northern part of the Humboldt Range (modified from Silberling and Wallace, 1967; Wallace *et al.*, 1969a; Heck, 1987; present research) (see geologic map, Figure 2).

층군과 중기 삼척기의 스타피크 층군으로 구성된 암석 위로 오우버 드레스트함에 따라 발달된 구조물들이다. 험볼트 산맥의 현지성 암석은 대부분 녹색 편암상으로 광역 변성 작용을 받았지만 국부적으로 더 높은 단계의 광역 변성 작용을 받은 것으로 알려진다. 이것은 녹색 편암상보다 높은 단계의 변성

광물군 즉 클로리토이드, 홍주석, 남정석 그리고 규선석 등의 존재에 기인한다. 험볼트 산맥은 쥐라기와 백악기 초기의 네바다 조산운동에 의해 광역적 배사 습곡 구조로 이루어졌다(Johnson, 1977)(Fig. 3a, 3b). 서로 다른 습곡 구조의 양상과 그와 관련된 조지의 발달에 기초하여, Heck(1987)은 험볼트

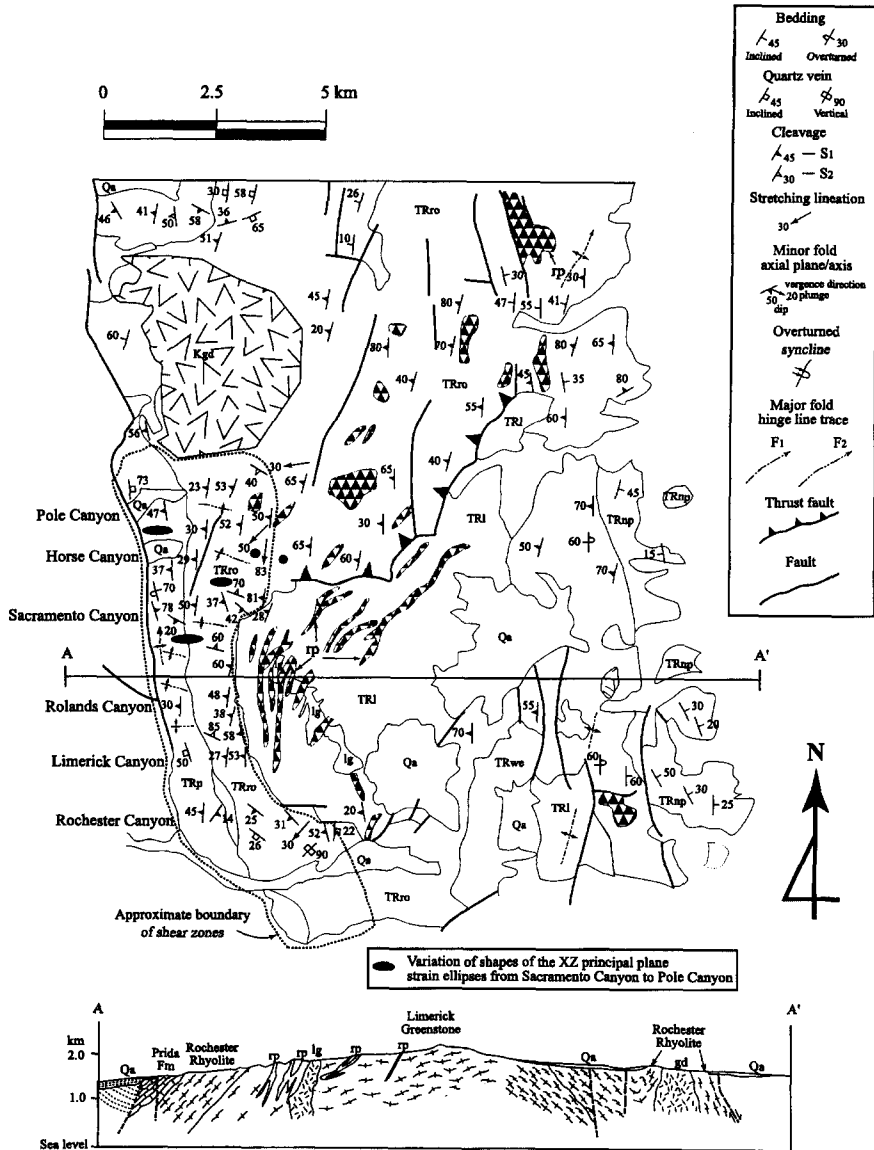


Fig. 3b. Structural map of the mid-western part of the Humboldt Range (modified from Silberling and Wallace, 1967; Wallace and others, 1969b; Heck, 1987; present research) (Geologic boundaries and symbols refer to Figure 2).

산맥의 최북부 지역의 구조 분석을 통해 적어도 여섯 차례의 광역 변형 작용을 받은 것으로 해석하였다(D₁-D₆). D₁, D₂ 그리고 D₃ 변형작용은 중생대 전지 변형작용(Foreland deformation)에 관련되어 있으며, 반면 D₄, D₅ 그리고 D₆ 변형 작용을 신생대의 고경사 정단층군과 그리고 매우 미약한 엽리구조를 발달시켰다(Heck, 1987). Heck(1987)의 연구결과를 요약하면 D₁ 구조는 남동 방향으로 전향하

는 습곡구조와 드러스트 그리고 서쪽과 북서쪽으로 경사지는 치밀한 조직의 엽리구조이며, D₂ 구조는 이질성 쇄설암으로 구성된 그래스 밸리 층(Grass Valley Formation)에 발달된 북서주향의 파랑 벽개(crenulation cleavage)의 발달, 마지막으로 D₃ 구조는 남동 방향의 습곡축을 갖는 역전된 향사 습곡구조 등으로 이루어진다.

Heck(1987) 구조 분석에 의하면 D₁, D₂, 그리고

D₃ 구조의 발생기구는 중생대 전지 변형작용으로 해석된 반면, 본 연구에서는 D₁과 D₂ 구조는 펜스메이커 드리스트를 따른 중생대 백악기초 이전의 전지 변형작용으로 형성되었지만, D₃ 구조는 백악기 중기와 말기에 북 또는 북북동 주향의 D₁ 엽리 구조에 대체로 평행한 변성 석영맥을 형성했으며 D₁ 엽리구조의 재활동에 의한 결과로서 해석되었다.

D₁ 구조

북부 험볼트 산맥

최초의 광역 변형 작용에 대한 구조는 20°-45° 서쪽으로 경사진 매우 잘 발달된 엽리구조와 동쪽으로 전향(verge)된 습곡구조들로, 험볼트 산맥의 서쪽 경계부를 따라 형성된다(Fig. 3a; Fig. 4a).

D₁ 엽리면의 주향은 일반적으로 N25°-45E°이며

10°-60°NW로 경사진다. 이러한 D₁ 엽리면은 험볼트 산맥의 동쪽이나 중앙부로 갈수록 약해지며 광역적인 배사 습곡구조(Fig. 3a와 3b의 단면도 참조)의 동쪽에서는 흔히 나타나지 않는다.

D₁ 엽리구조의 발달은 암석의 종류에 따라 크게 좌우된다. 즉 천매암, 엽상 석회암, 슬레이트, 그리고 이암과 같은 덜 강인한(incompetent) 암석에 잘 발달하며 대체로 층리면에 평행하다. 한편 D₁ 엽리 구조는 운모질의 미사암과 세립질의 사암과 같은 강인한 암석에서는 미약하거나 나타나지 않는다. 스타피크 층군에서의 암상차이로 인해 결과적으로 엽리 구조의 강도와 엽리 구조의 굴절에서의 변화를 일으켰다. 이같은 D₁ 엽리 구조의 굴절(refraction)은 험볼트 산맥의 북서쪽 임레이 캐년(Imlay Canyon)에서 가장 잘 관찰된다(Fig. 3a). 험볼트 산맥의 엽리구조가 프리다 층(Prida Formation)의 엽상의 석

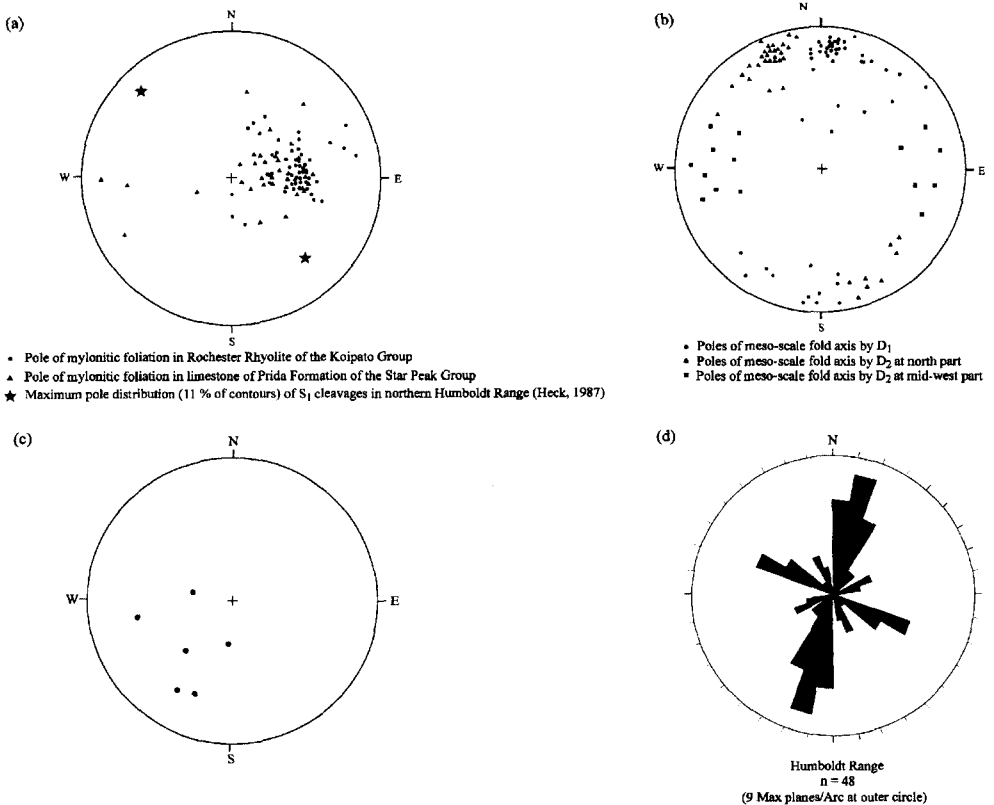


Fig. 4. Plot of structural data in the Humboldt Range, Nevada, U. S. A. Plots of figure (a), (b), and (c) used equal area projection. (a) Plot of poles of mylonitic foliation in the Rochester Rhyolite and Prida Formation in mid-west part of the Humboldt Range. (b) Plot of poles of meso-scale fold axes in the Humboldt Range. (c) Plot of mineral stretching lineations in mid-west part of the Humboldt Range. (d) Rose diagram showing consistent distribution of metamorphic quartz veins in both north and mid-west part of the Humboldt Range. Note that northeast veins are formed during the Late Cretaceous, while the age of formation in the northwest-trending veins is uncertain.

회암에서 세립질의 사암으로 통과하는 곳에서 밀집된 면구조의 방향은 층리면에 상대적으로 갑자기 변화한다. 이러한 면구조의 굴절 현상은 엽상의 석회암에서만 존재하며 세립질의 사암에서는 거의 발견되지 않는다. 엽리구조와 층리면 사이각은 일반적으로 32°에서 36°정도의 변화한다. 임레이 캐년(Imlay Canyon)에서의 엽리구조는 특징적인 안행상 모양을 갖는다. 안행상 모양의 엽리구조는 소규모의 굴곡된 엽리구조로 덜 강인한 엽상의 세립질 석회암에서만 관찰되며 급격한 암상 변화에 기인한 면구조의 굴절현상으로 해석된다. 북쪽 험볼트 산맥에서의 D₁ 엽리구조의 발달은 급격한 암상의 변화와 암석의 강인도 차이에 기인한다.

북부 험볼트 산맥의 코이파토 층군에서의 D₁ 엽리구조는 일반적으로 관통상이며 1 cm에서 5 cm의 폭을 갖는 개별적 전단대와 관련 있다. 전단대 내의 암석은 좌수향 전단각각을 갖는 S/C 조직의 변형된 구과상 구조와 밀접히 관련된다. 좌수향 전단각각은 D₁ 엽리구조를 포함한 변형된 구과상 구조의 S/C 조직과 소규모의 개별적 전단대로 판단되며, 엽리면의 상부가 SE 또는 ESE 방향으로 이동되었음을 나타낸다. 임레이 캐년(Imlay Canyon)의 삼척기 중기의 스타피크 층군의 석회암에서의 소규모 전단대는 석회암과 유문암의 쇄설과 함께 대체로 1 cm 길이의 단층 가력암은 포함하며 또한 좌수향 전단방향을 갖는다. 이러한 전단방향은, 스타피크 층군에서의 수 cm 폭을 갖는 층리면에 평행하며, 동쪽으로 전향(verge)하는 전단대의 전단방향과 같으며 Heck(1987)의 연구를 통해 확인되었다.

D₁ 습곡구조(F₁)는 동쪽이나 서쪽으로 전향하며, 비대칭 습곡 구조들이며 지엽적으로 횡와 습곡구조와 역전된 습곡구조를 포함한다. 습곡축은 대체로 저각으로 경사하며 NNE에서 SSW방향이다. D₁ 습곡구조는 후기의 변형작용(D₂)에 의해 재습곡되어 있으며, Ramsay and Huber(1987)의 간섭 습곡형 3 (Type 3) 즉 수렴-발산형 또는 중첩된 Z 모양의 간섭 습곡형(F₁+F₂)으로 분류된다(Fig. 5).

북부 험볼트 산맥에서의 또 다른 특징적인 D₁ 조직의 발달은 구조적 응력에 의해 형성된 전위엽리(transposed layering)이며 Fig. 6과 7은 특징적인 전위 엽리에 대한 노두 사진이다. Fig. 6에 나타난 노두는 암회색 석회암 주변에 발달한 조각상(patchy shape)의 심하게 변형된, D₁ 엽리구조에 평행하게 배열된 전위 엽리들이며, 암회색 석회암 내의 암갈색 전위 엽리를 포함한 석회암은 습곡된 층리구조의 잔유물을 포함하고 있으며, 전위엽리에 평행한

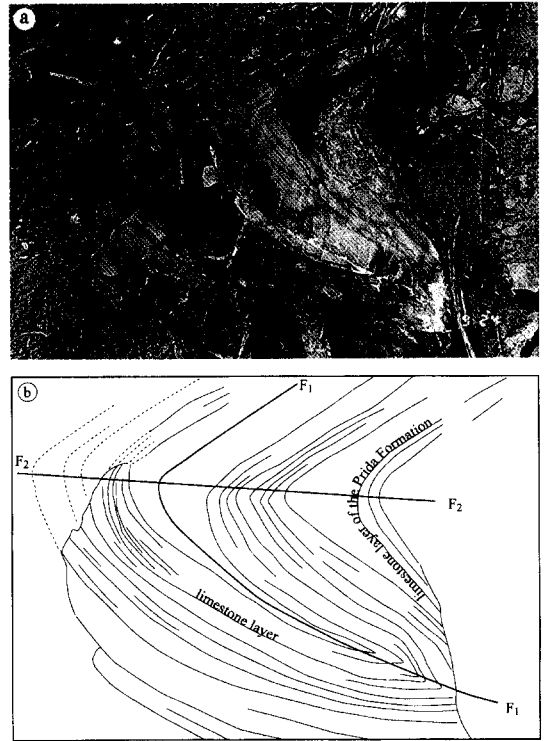


Fig. 5. Outcrop showing "Double zig zag" fold interference pattern in limestone of the Prida Formation in Eldorado Canyon in the northern Humboldt Range, hammer shown in photo is 28cm-long, looking approximately southeast (see Figure 3a for location). (b) Sketch of photograph (a). F₁ and F₂ indicate fold hinge line traces of D₁ and D₂ deformations, respectively.

습곡축면을 갖는 수많은 소습곡구조로 이루어져 있다. D₁ 전위엽리의 또 다른 증거는 갈고리(hook) 모양의 수많은 방해석 소습곡들이며(Fig. 7), 이들 소습곡 구조는 구조적 엽리 구조에 평행하게 발달되거나 심하게 습곡되어 있다. 이러한 D₁ 전위엽리는 펜스메이커 드러스트와 동시에 활동한, 서쪽으로 경사진 험볼트 시티 드러스트(Humboldt City thrust)의 활동에 기인한다(Fig. 3a).

중서부 험볼트 산맥

중서부 험볼트 산맥의 D₁ 구조는 일반적으로 서쪽으로 경사진 NE 주향의 엽리구조와 소규모 습곡구조 그리고 프리다 층과 코이파트 층군에 발달된 신장된 광물 선구조로 구성된다. 습곡구조의 파장은 펜스메이커 드러스트에서 멀리 떨어질수록 즉 광물입자의 변형도와 함께 험볼트 산맥의 중앙부와 동부로 갈수록 감소한다. 이 지역의 엽리구조 역시



Fig. 6. Transposed layer of the Prida Formation developed in the Imlay Canyon along the Fencemaker thrust from northern part of the Humboldt Range, U. S. A., looking NNE, pencil for scale: 18 cm. (b) A sketch from figure (a) showing remnant of folded bedding and early-formed fabrics which define transposed layering. Note that another evidence of transposed layering is shown as development of calcite hook folds at lower right corner.

관통상이며 층리구조에 대체로 평행하다. 삼첩기 하부 코이파토 층군의 라체스터 유문암에서의 D_1 엽리구조(S_1)는 밀집된 편상구조, 압쇄 엽리구조, 또한 규칙적인 전단 벽계의 발달 등으로 구성된다.

라체스터 유문암(Rochester Rhyolite)의 화산회류 응회암과 용암류내에 발달된 엽리구조는 남북의 주향과 대체로 45° 내외의 서쪽 경사 방향으로 일정하게 발달되어 있으며 심하게 변형되거나 압쇄화되어 있다. 엽리구조 사이의 간격은 비동축 진행성 총합 단축작용(non-coaxial progressive bulk shortening) 동안 암석의 이질성으로 인한 변형되지 않는 거시적 암괴(megalithon)의 발달에 기인한다. 이러한 형태의 D_1 엽리구조의 발달은 Bell(1981; 1985)에 의해 제안된 변형 작용의 분대(deformation partitioning)의 용어로 잘 설명된다.

중서부 험볼트 산맥내에 발달된 특징적인 D_1 엽

리구조는 험볼트 산맥의 동부와 중앙부로 갈수록 엽리구조의 간격이 증가하며 리머릭 그린스톤(Limerick Greenstone)과의 경계부에서부터 나타나지 않는다. 프리다 층에서의 D_1 습곡구조는 매우 복잡하며 이것은 후기의 변형작용에 의해 D_1 구조들이 서로 중첩되었기 때문으로 해석된다. 습곡구조(F_1 , F_1+F_2)는 완사(gentle), 개방(open), 타이트(tight) 그리고 등사습곡 등 매우 다양하다. D_1 습곡구조의 양상은 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 완사 습곡으로부터 등사 습곡으로 점이적으로 변화한다. 중서부 험볼트 지역에서 F_1 습곡구조가 남에서 북으로 갈수록 등사 습곡화하는 현상은 펜스메이커 드러스트의 구조적 이동이 차별적으로 작용했거나 또는 F_2 습곡구조를 형성케 한 남북 방향의 횡압력의 강도의 크기가 서로 달리 작용된 결과로 해석된다. 이러한 해석은 다음에 설명할 북부 험볼트 지역의 F_2 습곡축

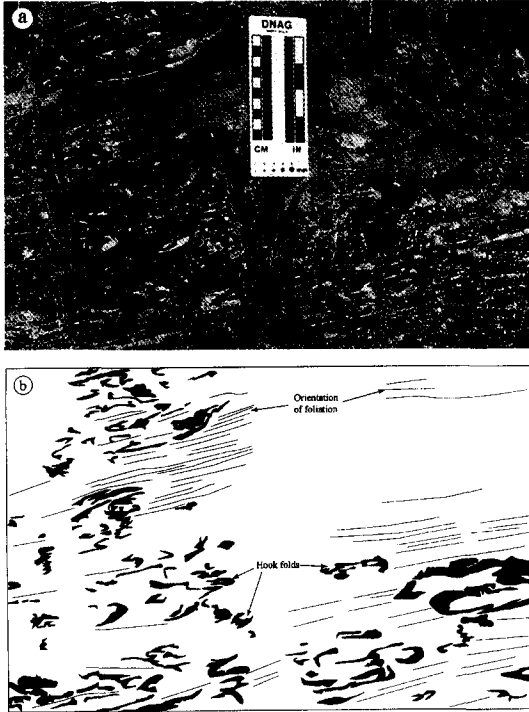


Fig. 7. Transposed layer developed in limestone of Prida Formation between the Humboldt and Inlay Canyons in the north Humboldt Range, U.S.A., looking NNE. (b) Sketch of picture (a) showing tectonic foliation and development of abundant hook folds of small calcite veins.

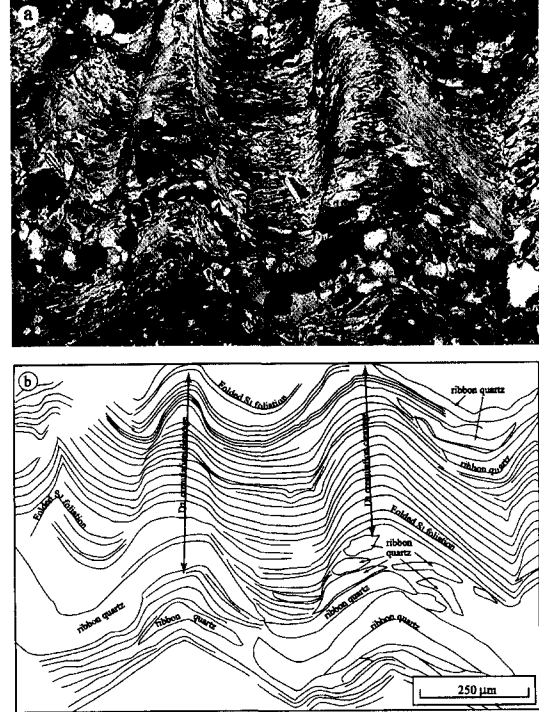


Fig. 8. Photomicrograph of S_2 crenulation cleavage developed perpendicular to S_1 mylonitic foliation of the Rochester Rhyolite in Sacramento Canyon in mid-western part of the Humboldt Range (see Figure 3b for location). Thin section is normal to foliation and parallel to lineation under crossed polars. (b) Sketch of photograph (a).

의 방향과 중서부 험볼트 지역 F_2 습곡구조의 파장과 파고의 변화로 판단된다(Fig. 4b). 광역적 배사구조의 서쪽 부근에 발달된 대부분의 기생 습곡구조는 비대칭 S 모양의 습곡형으로 기생 습곡구조를 포함한 배사구조의 서쪽 부근은 역전된 횡외습곡으로 이루어졌음을 나타낸다. 소규모 습곡축의 방향은 N과 NNE 방향으로 일정하며 스테레오 투영에서 미약한 점대적 분포를 보여준다(Fig. 4b). 이 지역에서의 D_1 습곡구조는 후기의 D_2 변형 작용에 의해 돔 앤드 베이스 간섭 습곡상으로 재습곡되었다(Fig. 9).

D_2 구조

북부 험볼트 산맥

험볼트 산맥의 북부 지역에서의 D_2 변형 작용에 의한 조직의 발달은 매우 미약하다. 즉 D_2 엽리구조는 매우 미약하게 발달되거나 또한 그 분포 역시 광범위하지 않다. 북부 험볼트 산맥의 임레이 캐년(Inlay Canyon)에서 파랑 벽개가 소규모 습곡구조

와 함께 지역적으로 존재하기도 한다. 이 지역의 프리다 층에서의 파랑 벽개(crenulation cleavage)는 D_1 엽리구조에 수직하게 발달되었다. 그러나 험볼트 산맥의 북부 지역에서 나타나는, 조립질이며 이질성 쇄설암으로 구성된 그래스 밸리 층(Grass Valley Formation)과 나체스 패스 층(Nat-chez Pass Formation)에서는 잘 관찰되지 않는다. 따라서 이러한 지역적인 D_2 엽리구조의 발달은 소규모로 발달된 지역적 습곡과 암석의 물리적 특성에 기인하는 것으로 해석된다.

대표적 F_2 습곡구조는 F_1 습곡구조에 중첩된 수렴-발산형(Fig. 5)으로 습곡축의 방향은 F_1 습곡축에 대체로 평행하게 발달된다(Fig. 4b). F_2 습곡축의 방향은 저각의 NNW와 SSE로 전반적인 소규모 습곡축의 동면적 스테레오 투영으로 판단할 때, F_1 습곡축의 방향에 10-30° 시계 반대 방향으로 회전되어 발달되었음을 나타내지만 소규모의 지역적으로 발달된 파랑벽개 방향성과 F_2 습곡구조는 대체로

일치하지 않는다. 이것은 비관통상 파랑벽개의 형성시기가 F₂ 습곡구조와 동시에 형성되지 않았거나 또는 백악기 중기와 말기(D₃ 변형작용)에 연구지역에 작용한 북동-남서 방향의 광역 주응력에 반응하여 형성되지 않았나 사료된다. 이러한 분석은 잘 발달된 F₂ 습곡 구조에 비해 파랑벽개의 발달은 매우 미약하며 또한 소규모로 분포하며 변성 석영맥의 주향 방향에 대체로 수직하게 발달되었기 때문이다. 하지만 Heck(1987)과 Elison (1987)은 북부 험볼트 지역과 이에 인접한 구조적으로 매우 유사한 지역의 연구를 통해 파랑 벽개의 형성 시기는 F₂ 습곡구조의 발달시기와 동일하며 F₂ 습곡 측면에 평행하게 발달된다고 해석하였다.

중서부 험볼트 산맥

중서부 지역에서의 D₂ 변형 작용에 의해 형성된 조직은 북부 지역에서와 같이 미약하게 발달되어있으며 지역적이고 또한 소규모로 분포한다. 하지만 험볼트 중서 지역 새크라멘토 캐논(Sacramento Canyon)(Fig. 3b)에서 라체스터 유문암내에 형성된 지역적인 파랑 벽개가 D₁ 엽리면에 수직하게 잘 발달되어 있지만 관통상은 아니다(Fig. 8).

험볼트 산맥의 중서부 지역에서의 습곡구조는 삼첩기 중기의 프리다 층의 습곡(F₁)과 밀접히 관련되며, 주로 돔 앤드 베이스 간섭 습곡상으로 특징 지워진다(Fig. 9). 이러한 간섭 습곡상은 남북 방향의 습곡축을 갖는 D₁ 습곡구조의 재습곡에 기인하며, D₂ 변형작용을 유발한 광역 주 압축 응력은 대체로 남북 방향의 수평 횡압력으로 해석된다. 습곡구조의 태위(fold attitude)는 남부에서 북부로 갈수록 점이적인 변화하며, 즉 남부에서는 긴 파장과 낮은 파고를 갖는 습곡구조가 주로 존재하지만 북부에서는 상대적으로 짧은 파장과 파고를 갖는 습곡구조로 이루어졌다. 이러한 습곡 구조에서의 변화는 D₂ 변형작용의 강도가 남에서 북으로 갈수록 증가했기 때문에 일어난 현상으로 해석된다.

D₃ 구조

험볼트 산맥의 북부와 중서부 지역에 흔히 나타나는 변성 석영맥과 안행상 석영맥은 험볼트 산맥의 특징적인 D₃ 구조이다. 변성 석영맥의 방향은 이들 두 지역에서 북북동-남남서 방향으로 일정하게 배열되어 있으며(Fig. 3a, 3b, Fig. 4d), 대체로 매우 치밀한 D₁ 엽리구조에 평행하나 D₁ 엽리구조를 저각으로 절단하기도 한다. 이러한 크로스컷 관계로

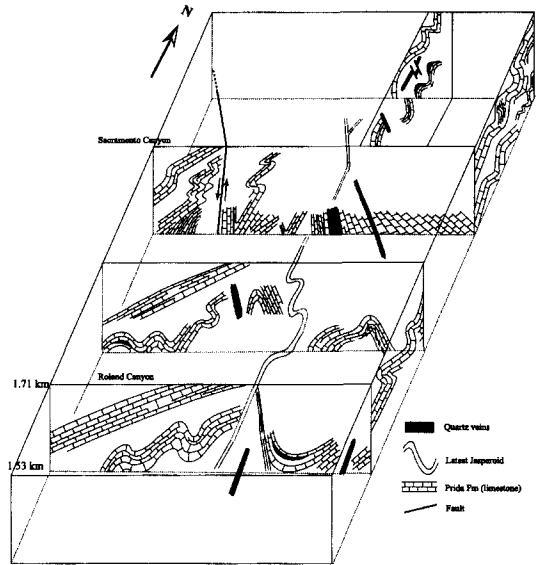


Fig. 9. Generalized cross section showing "Dome and Basin" structures formed by superposed folding in deformation of the Prida Formation and its associated occurrences of quartz veins along the western flank of the mid-western part of the Humboldt Range (see Figure 3b for location).

변성 석영맥의 형성시기를 추측하는 것이 가능하다. 앞서 설명한 현지성 암석군의 녹색 편암 변성시기는 주라기에서 펜스메이커 드러스트의 활동 말기인 백악기 초로 알려져 있다(Johnson, 1977). 따라서, 변성 석영맥은 현지성 암석군의 변성후인 초기 백악기 이후에 발달되었음을 알 수 있으며 또한 연구지역에서의 K-Ar 연대 측정 결과 백악기 중기에서 말기로 밝혀 졌으며(Table 1), 본 연구지역 이외의 정고와 블랙락 테레인(Fig. 1)에서의 변성 석영맥의 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 연대 측정 역시 이와 매우 유사한 결과를 얻었다(Cheong *et al.*, 1999).

WNW-ESE 방향의 일련의 석영맥(Fig. 4d)은 앞서 언급한 변성 석영맥과 험볼트 산맥 전 지역에서 D₁ 엽리구조를 절단하며 정확한 연대측정은 이루어지지 않았지만, 신생대 취생 변형작용에 관계 있는 듯 하다. 이것은 변성 석영맥의 발달과 무관하며 경제적 중요성, 즉 금, 은 등 귀금속과 희귀원소를 다량 포함하지 않기 때문이다.

안행상 석영맥은 중서부 험볼트 지역의 라체스터 유문암 내에 잘 발달하고 있으며 연성 전단대에서의 전단 감각을 유추할 수 있는 중요한 구조이다. 일련의 안행상 석영맥은 연성 전단대의 중심에서는 D₁ 압쇄 엽리 구조를 고각으로 절단하지만, 석영맥

Table 1. K-Ar age data of the metamorphic quartz veins in Humboldt Range, Nevada, U.S.A(see Figure 1 for sample locations)

Location No.	Description	Location	Mineral dated	Method	Age (m.y.)	Reference
1	Quartz-sulfide vein	Nevada Packard Mine Nenzel Hill	Sericite	K-Ar	78.8±2.4	(1)
2	Quartz-sericite-sulfide vein		Sericite	K-Ar	85.7±4.3	(1)
3	Quartz-biotite vein	Stalin's Present Mine	Biotite	K-Ar	81.7±2.4	(2)
4	Quartz-biotite vein	Starlight Mine	White mica	K-Ar	85.3±2.5	(2)
5	Quartz-sulfide-sericite vein	Nenzel Hill.	White mica	K-Ar	97.6±3.0	(2)
6	Quartz-muscovite vein	Hollywood Mine	Muscovite	K-Ar	114.1±4.0	(3)
	Quartz-clinocllore-stibnite vein		clinocllore	K-Ar	103.4±10.0	(2)

Locations of the metamorphic gold-quartz veins for age dating are shown in Figure 1.

Reference numbers are listed below: (1) Vikre(1981), (2) Vikre and McKee(1985), (3) Russell *et al.*(1989).

양쪽 선단의 방향은 D₁ 엽리구조를 점차 저각으로 절단하며 연성 전단대 가장자리에서 D₁압쇄 엽리 구조에 거의 평행하게 발달된다(Fig. 10). 이들 양쪽 선단의 방향이 연성 전단대에 작용한 응력으로 D₁ 엽리면 상부가 북북동 방향의 이동을 나타내는 우수 전단 감각을 보여준다. 이러한 우수 전단 감각을 갖는 안행상 석영맥은 중서부 험볼트 산맥의 북부 지역, 즉 포울 캐년(Pole Canyon)으로부터 로랜즈 캐년(Rolands Canyon)에서 다수 관찰된다(see Fig. 4b for location).

요약하면 변성 석영맥과 안행상 석영맥의 주방향은 NNE-SSW이며 이러한 주방향의 구조를 형성하기 위해서는 기존에 발달된 남북 주향의 D₁ 엽리 구조에 비스듬한 NNE-SSE방향의 광역 동축 응력(regional coaxial stress)이 연구지역에 작용했으며,

연성 전단대내에 발달한 안행상 석영맥의 주방향으로 판단된 전단 감각은 광역 동축 응력의 방향과 평행한 우수 전단 감각을 보여 준다.

전단대의 압쇄암

험볼트 산맥의 중서부 즉 펜스페이커 드러스트의 동쪽 경계부를 따라 발달된 전단대는 대략 2.0-2.5 km의 폭을 갖는 연성 전단대이며, 신장된 방해석과 석영 입자, 신장된 구과상 구조 그리고 환원반점(reduction spot) 등의 유한 변형량 측정으로 판단된 높은 변형률과 강력한 압쇄 구조를 갖는 암석으로 구성된다. 연성 전단대의 강도는 앞서 설명한 D₁ 엽리구조와 더불어 서쪽에서 동쪽 즉 펜스페이커 드러스트로부터 멀어질수록 점차 감소하여 리머

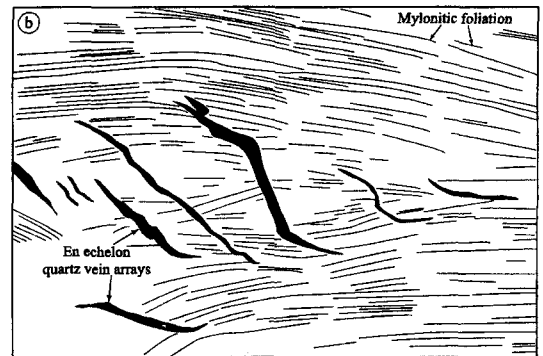


Fig. 10. Photograph of sigmoidal shape of en echelon vein arrays showing dextral sense of shear. (a) En echelon vein arrays cross cut well-developed mylonitic foliation, near Champion Mine, Rolands Canyon, mid-western part of the Humboldt Range, Nevada, looking approximately northeast (pencil for scale in lower center: 18cm-long). (b) Sketch of photograph (a) showing that final orientations of the en echelon veins are consistent with one another at the tip of the veins.

릭 그린스톤에서는 압쇄구조가 관찰되지 않으며(Fig. 3b), 북부 험볼트 지역에서는 취성 전단대로 변화한다. 연성 전단대 강도에서의 변화(동-서)는 압쇄암을 형성케 한 타지성 정교 테레인이 펜스메이커 드리스트를 따라 현지성 암석인 험볼트지역으로 점이적으로 오우버 드리스트하였기 때문이며, 북부 험볼트지역에서 취성 전단대로의 발달은 작용한 압력이 급격한 압상의 변화에 기인하여 차별적으로 영향을 끼친 듯하다. 왜냐하면 중서부 연성 전단대의 주 구성 암석은 석회암으로 구성된 프리다층과 유문암으로 구성된 라체스터 유문암등 세립질이고 대체로 균질한 암석으로 구성된 반면, 북부 험볼트지역의 주 구성 암석은 이질성 쇄설암으로 다양하고 불균질한 암석으로 구성되어 있기 때문이다.

험볼트 산맥 중서부 지역의 전단대 내에 발달된 여러 종류의 압쇄암은 광역적 펜스메이커 드리스트를 따라 잘 인지되며, 나타나는 압쇄암의 종류는 다음과 같다: 초압쇄암, 압쇄암, S/C압쇄암 그리고 단층 각력암 등이다. 이들 압쇄암의 전단감각은 야외 조사시 노두에서 관찰된 전단면 벽개의 방향과 신장된 구과상 구조의 변형, 그리고 S/C 압쇄암의 압쇄조직과 그리고 채취한 압쇄암의 미세구조 분석, 즉 σ 형태의 결정이나 입자, K-장석의 반상 채정에 발달한 미세 단층의 변위와 책 선반 구조(book shelf structure), 또한 K-장석이나 구과상 구조에 대해 비대칭으로 발달한 엽리구조 등으로 이루어졌으며 분석된 전단 감각은 엽리구조의 상부가 동쪽으로 이동한 우수 전단 감각이었다.

초압쇄암

초압쇄암은 프리다 층의 석회암에서 나타나며, 펜스메이커 드리스트의 접경부를 따라 존재한다. 하지만 프리다 층의 모든 석회암이 압쇄화되지는 않았으며 이것은 앞서 설명한 변형 분배에 기인한다. 초압쇄암은 대략 100 μm 길이의 신장된 방해석 입자로 이루어졌으며 최대 변형률 축(X-방향)에 평행하게 배열돼 있다. 하지만 후기의 방해석 맥의 침입으로 불규칙한 거정질 방해석 입자와 함께 존재한다. 초압쇄암 내의 엽리구조는 관통상(50 μm 두께)이며, 층리면에 거의 평행하며, 변형 타원체의 XY 면상에 잘 발달된 신장 선구조를 보여준다(Fig. 11a).

압쇄암

험볼트 산맥 중서부의 라체스터 유문암(Rochester Rhyolite)(Fig. 2)은 대부분 압쇄암으로 변형되었으

며, 형성된 압쇄 엽리는 관통상이며 프리다 층의 층리면에 거의 평행하게 발달된다(Fig. 11b). 가장 특이한 양상은, 기질내의 변형작용이 매우 강력하여 변형되지 않은 유문암의 원래 조직 즉 유타시틱 조직(eutaxitic texture), 구과상(spherulitic), 그리고 타원 구과상(axiolitic) 성장 특성 등이 압쇄작용에 기인하여 대부분 제거되었다는 것이다. 그러므로 이 지역의 압쇄암이 유문암질 용암류(lava flow)에서 또는 화산회류 응회암(ash flow tuff)에서 유래되었는지는 알 수 없다. 압쇄 편암 내에 발달된 엽리구조는 물결 모양의 굴곡된 엽리구조로 나타나며 전단 방향을 암시하는 다수의 안행상 석영맥으로 이루어졌다. 후기의 변형작용에 의해 발달된 파랑 벽개가 압쇄 엽리구조를 수직하게 절단하기도 한다(Fig. 9). 전단대 내의 압쇄 엽리구조는 재결정된 석영입자, 연성 변형작용의 대표적 특징인 석영의 리본 구조(ribbon structure), 취성 변형된 K-장석의 반상 채정, 매우 잘 배열된 운모 광물, 그리고 신장된 구과상 구조 등이며 측정된 전단 감각은 우수 전단 방향이다.

S/C 압쇄암

S/C 압쇄암(Lister and Snoke, 1984)은 중서부 험볼트 산맥의 폴 캐년(Pole Canyon)과 새크라멘트 캐년(Sacramento Canyon)의 라체스터 유문암(Fig. 2)에서 가장 잘 발달되었다(Fig. 11c). 수 mm에서 10 mm 두께의 벽개 간격을 갖는 S/C 압쇄 조직은 특징적인 두 개의 엽리구조를 갖는다(S-면 과 C-면). 파쇄된 기질 물질은 탈유리화 되어 결정의 성장을 볼 수 있으며, 이들은 모두 매우 신장된 형태로 S-면구조에 평행하고 보통 3.5 cm 길이로 압쇄 작용동안 신장되었다. 일반적으로 S-면구조와 C-면의 사이각은 10°-15°이지만 40°의 각을 이루는 압쇄암도 흔하다. 측정된 전단감각은 우수 전단 방향이다.

단층 각력암

단층 각력암과 엽리구조를 갖는 단층 각력암은 리머릭 캐년(Limerick Canyon)(Fig. 3b)에서 S/C 압쇄암과 함께 존재하며 라체스터 유문암의 파쇄작용에 기인한다(Fig. 11d). 이러한 단층 각력암은 곳에 따라 약한 엽리구조를 이루며 수 mm에서 5 cm길이의 파쇄 각력을 포함한다. 파쇄된 각력은 대부분 불규칙한 각질의 모난 모양으로 구성되며, 불용성 잔류물과 세립질의 운모로 구성된 미약한 엽리 구조를 띤다. 모든 기질 물질은 유리질이며 결정 성

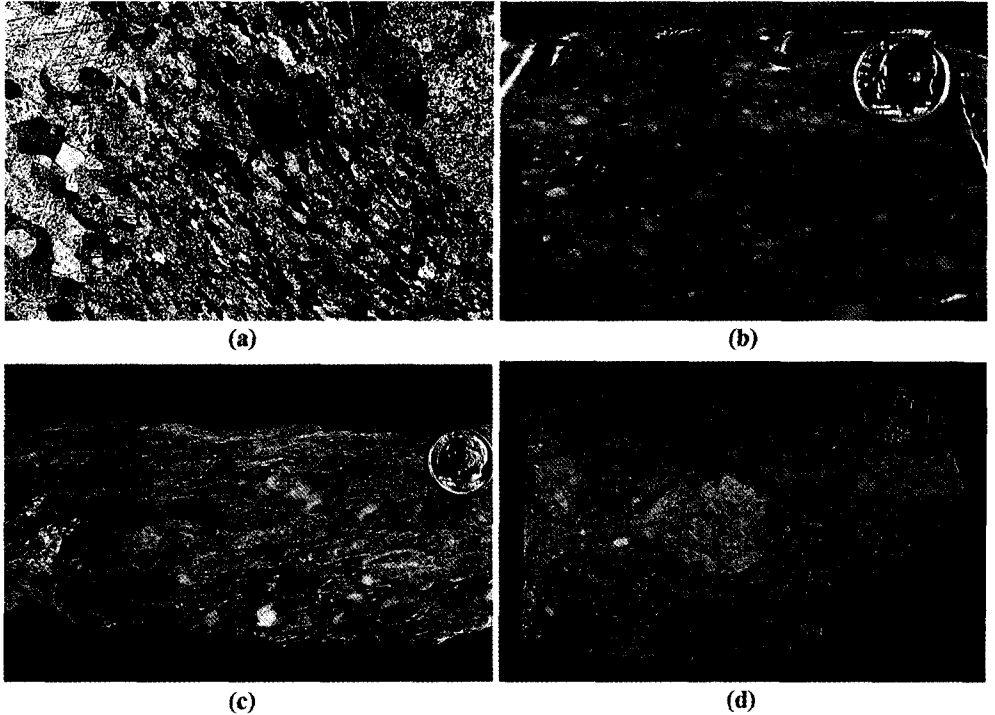


Fig. 11. Different types of mylonites developed along the Fencemaker thrust in the middle west of the Humboldt Range. Thin section and rock slabs are normal to foliation and parallel to lineation. (a) Photomicrograph of ultramylonite in limestone of the Prida Formation, field of view: 1.3 mm, crossed polars. (b) Rock slab showing mylonite in the Rochester Rhyolite, a coin for scale: 2.5 cm in diameter, (c) Rock slab of S/C mylonite showing characteristic foliations at an angle of 15°, a coin for scale: 1.7 cm in diameter, (d) Rock slab of foliated fault breccia in the Rochester Rhyolite, a coin for scale: 1.8 cm in diameter.

장이 이루어지지 않았다. 대부분의 파쇄 각력암은 변형되지 않는 유문암의 일차 호상구조(primary banding)를 그대로 유지하지만, 호상구조의 방향은 모두 다르며 이것은 라체스터 유문암이 심하게 파쇄되었음을 암시한다.

변형작용의 양상과 강도에서의 변화

구조 분석과 험볼트 산맥의 변형 작용의 강도는 서로 다른 기원의 압쇄암의 산출, 엮리구조의 간격, 환원 반점, 그리고 신장된 광물입자와 파편 등으로 판단할 때 일반적으로 펜스메이커 드러스트로부터 멀어질수록 감소함을 알 수 있다. 또한 이러한 광역적인 드러스트에서 멀어질수록 나타나는 압쇄암의 종류 역시 변형작용의 강도가 약해지는 순으로 나타난다: 초압쇄암, 압쇄암, 압쇄 편암, S/C 압쇄암, 그리고 단층 각력암 순이며 약간 변형된 전단 띠(shear band)를 갖는 암석으로 전위한다.

변형량 측정에서의 점이적인 변화 역시 특이하

다. 이차원적 변형 타원에 대해서는 Robin(1977)의 변형량 측정법을 이용하였으며, 삼차원적 변형 타원체에 대하여 Gendzwill and Stauffer(1981)의 측정 방법을 이용하였다. 프리다 층군에서의 유한 변형량 측정(finite strain measurement) 결과는 신장된 방해성 결정과 환원 반점으로부터 각각 3.91:1.00(X:Z 비율)과 2.60:1.00:0.63(X:Y:Z). X-방향은 변형 타원체의 최대 변형축(X)과 평행하며 광물의 최대 신장 선구조와 일치한다. 전단대 내의 라체스터 유문암의 변형된 구과상 구조의 변형량 측정 결과는 2.43:1.00:0.85이었으며, 미약하게 변형된 유문암에서의 변형량 측정은 1.20:1.00(X:Z)이다. 변형량 측정 결과로부터 변형 강도는 서쪽에서 동쪽으로 즉 펜스메이커 드러스트로부터 멀어질수록 감소함을 알 수 있다(Fig. 3b).

마지막으로 습곡 구조의 변화 양상 역시 특이할 만하다. 습곡구조는 중서부 험볼트에서 북부 험볼트로 갈수록 완사나 개방습곡으로부터 타이트나 등사 습곡으로 변화함을 알 수 있다. 이러한 습곡구

조는 후기의 변형 작용(D₂나 D₃)에 의해 서로 중첩된 간섭 습곡상을 이룬다. 간섭 습곡상은 Ramsay and Huber(1987) 의하면 간섭 습곡상 형태 1(도움 앤드 베이슨 구조)와 형태 3(수렴-발산형 구조)으로 분류되며, 중서부 험볼트 산맥에서는 간섭 습곡상 형태 1이 주로 나타나지만 북부 험볼트 산맥에서의 간섭 습곡상은 대부분 형태 3으로 존재한다.

중서부 험볼트 지역의 간섭상은 남북 방향의 횡압력(D₂)에 기인하는 반면, 북부 험볼트 지역에서의 간섭 습곡상은 펜스메이커 드러스트의 점이적인 변형 작용에 기인하며 이러한 간섭 습곡상에서의 변화는 쥬라기와 백악기에서의 작용한 광역 주 응력 방향의 회전에 의한 것으로 해석된다. 이러한 해석은 험볼트 북부 지역에서의 F₂ 습곡구조의 양상과 습곡축의 방향으로 판단할 때, F₂ 습곡구조를 형성케 한 D₂의 변형작용은 D₁ 변형 작용과 마찬가지로 대체로 동서 방향의 횡압력으로 해석되지만 이것은 이 지역에서의 N 또는 S 방향으로 경사하는 파랑벽개의 형성 기구와는 일치하지 않는다. 이러한 방향에서의 불일치는 펜스메이커 드러스트의 이동 방향이 북부 험볼트지역에서 서로 달리 작용했기 때문인 것으로 사료된다. 즉 북부 험볼트지역에서의 펜스메이커 드러스트의 주향은 남북 방향에서 북동 방향으로 크게 변화하기 때문에 구조적 이동 방향이 지역마다 달라질 수 있기 때문이다.

중서부와 북부 험볼트 지역의 D₂ 변형작용을 유발한 횡압력의 방향에서의 차이는 백악기 초 펜스메이커 드러스트의 재활동(see Fig. 1 for Fence-maker B)에 기인한 듯하다. 펜스메이커 드러스트 B의 주 이동 방향은 북북동에서 북동 방향(Heck, 1987)으로 활동 시기와 지점으로볼 때 북부 험볼트 지역의 구조 발달이라기 보다는 중서부 험볼트 지역의 D₂ 구조 발달에 더 많은 영향을 끼친 것으로 해석된다. 따라서 북부 험볼트 지역에서의 D₂ 변형 작용은 동서 방향의 횡압력을 동반한 펜스메이커 드러스트(Fencemaker A)의 점이적인 변형 작용을 수용한 반면, 중서부 험볼트 산맥에서는 대체로 남북 방향의 횡압력을 동반한 펜스메이커 드러스트(Fencemaker B)의 재활동에 기인한 구조를 형성시켰다.

고응력 상태의 고찰

험볼트 지역에서의 펜스메이커 드러스트의 발달로 N 또는 NE의 주향을 갖는 엽리구조, N 과 NNE 방향의 습곡축 동쪽으로 전향하는 횡와 습곡

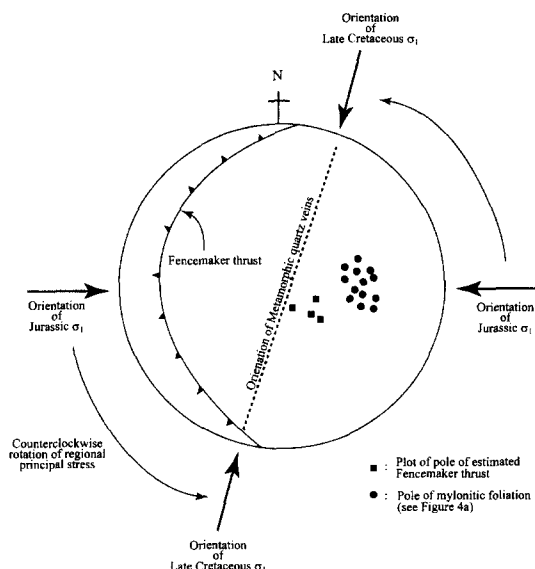


Fig. 12. Diagram showing state of paleostress acted in the Humboldt Range, Nevada, U. S. A. from the Jurassic to Late Cretaceous. Note counterclockwise rotation of paleostress.

구조, 전위 엽리구조, 그리고 다수의 전단대 등의 구조로 이루어졌다. 펜스메이커 타지성 암석의 구조적 이동 방향은 쥬라기와 백악기 초기까지 E와 ESE 방향이며, 따라서 이 기간 동안의 최대 주 압축 응력 방향은 본 지역에 가해진 압축 응력이 광역 동축 응력(regional coaxial stress)으로 가정하면, E와 ESE이며 대부분의 D₁ 구조를 형성하게 되었다. 초기 백악기 이후, 광역 압축응력(σ_1)의 방향은 NE-SW의 횡압력으로 변화되었다. 이러한 변화는 전단대 내에 잘 발달된 안행상 석영맥의 주 방향(N15°-25°E 주향)과 인장 변성 석영맥의 방향(N10°-30°E 주향)에 기인한다. 이들 석영맥의 주 방향(N10°-30°E 주향)과 압쇄 엽리구조의 방향(주로 N-S 주향/40°-70° W 경사), 그리고 전단대 내의 σ -형태의 입자 등으로 측정된 전단 감각은 우수 전단 방향이었으며, 이러한 사실은 기존에 형성된 강한 엽리구조(D₁)의 재활동에 기인되었다. 이러한 우수 전단 감각은 현지성 암석의 코이파도 층군과 스타피크 층군 내에 발달된 E 주향의 신장 선구조(Fig. 4c)의 방향 그리고 북부 험볼트 지역에서 측정된 전단대의 최수 전단 감각과는 다른 양상을 보인다. 또한 변성 석영맥의 K-Ar 연대 측정 결과는 80-110 Ma(백악기 중기와 말기)이었으며(Table 1), 쥬라기에서 백악기 초기의 펜스메이커 드러스트의 활동

시기와도 다르다. 그러므로 백악기 중기와 말기 동안에 본 지역에 작용한 최대 주 응력(σ_1)방향은 NNE-SSW이었으며, 백악기 중말기의 광역 변형 작용에 의해 변성 석영맥이 형성되었다(Fig. 4d). 이러한 사실은 유라기에서 백악기 동안 최대 주 응력 방향이 시계 반대 방향으로 회전되었음을 반영한다(Fig. 12).

결 론

미국 네바다 북서부에 위치하는 험볼트 지역의 삼첩기 현저성 암석군은 유라기의 광역적이 펜스메이커 드러스트의 발달로 인하여 적어도 세차례의 광역 변형 작용을 받았으며, 매우 복잡한 구조를 보여준다. 최초의 변형 작용(D_1)은 북 또는 북북동 방향의 일정한 엽리구조, 동쪽으로 전향하는 습곡구조, 암석의 구조적 이동에 의한 전위 엽리구조, 그리고 전단대 내에 잘 발달한 여러 종류의 압쇄암 등을 발달시켰다. 이들 구조들은 유라기에서 백악기 초기에 활동한 펜스메이커 타지성 암석군이 현저성 암석군 위로 오우버 드러스트함에 따라 발달된 구조이며, 연구지역에서의 최초의 중생대 전지 변형 작용으로 해석된다. 펜스메이커 타지성 암석군의 구조적 이동 방향은 암석의 세심한 구조 분석을 통해 북부 험볼트 지역에서는 동쪽이나 남동쪽으로, 중서부 험볼트 지역에서는 동쪽이나 동북동쪽임이 밝혀졌다.

전단대에 잘 발달된 전단면 벽개와 S/C 압쇄 엽리구조의 발달은 험볼트 지역의 전단대가 불균질 단층 전단 작용을 받았으며 또한 압쇄암 형성시 암석의 단축작용동안 발달된 비동축류(non coaxial flow)의 지역이었음을 나타낸다.

D_2 변형작용은 D_1 엽리구조에 수직하며, 미약한 파랑벽개의 발달과 밀접한 관계가 있다. 또한 D_1 엽리구조와 층리를 재습곡시켰으며 간섭 습곡상 형태 1(돔 앤드 베이스 구조)과 형태 3(수렴-발산 간섭상)으로 중첩된 습곡구조를 형성했다. 간섭 습곡상은 남에서 북으로 갈수록 간섭 습곡상 형태 1에서 형태 3으로 변화했다.

연구 지역의 백악기 중기와 말기의 변형작용(D_3)은 기존에 발달된 북 또는 북북동 주향의 엽리구조에 평행한 인장 변성 석영맥과 전단대 내에 발달한 여러 조(set)의 안행상 석영맥(en echelon quartz veins)을 형성했으나 이로 인한 엽리 구조의 발달은 미약하다. 이것은 기존의 엽리 구조에 대체로 평행한 전단 응력에 기인하는 것으로 해석되며, 변성 석

영맥과 변성 안행상 석영맥의 주 방향에 대한 구조 분석 결과 북동-남서 방향의 광역적 주 응력(σ_1)이 연구 지역에 작용했음이 밝혀졌다. 따라서 연구 지역에 작용한 광역 주 응력(σ_1)의 방향은 유라기로부터 백악기 후기까지 시계 반대 방향으로 회전되었음을 나타낸다.

참고문헌

- Bell, T.H., 1981, Foliation development-the contribution, geometry, and significance of progressive bulk inhomogeneous shortening: *Tectonophysics*, 127, 273-296.
- Bell, T.H., 1985, Deformation partitioning and porphyroblast rotation in metamorphic rocks: a radical reinterpretation: *Journal of metamorphic Geology*, 3, 109-118.
- Cheong, S., Peters, S.G. and Iriondo, A., 1999, Structural setting and fluid characteristics of metamorphic gold-quartz veins in northwestern Nevada: *Geological Society of Nevada Symposium Abstract* (in press).
- Doeblich, J.L., 1996, Resource assessment of the Bureau of Land Management's Winnemucca district and Surprise Resource area, northwest Nevada and California-Geology, and its relation to resource genesis: U. S. Geological Survey Open-File Report 96-30, 33.
- Elison, M.W. and Speed, R.C., 1989, Structural development during flysch basin collapse: the Fence-maker allochthon, East Range, Nevada: *Journal of Structural Geology*, 11, 523-538.
- Gendzwil, D.J. and Stauffer, M.R., 1981, Analysis of triaxial ellipsoids: their shapes, plane sections, and plane projection: *Mathematical Geology*, 13, 135-152.
- Heck, F.R., 1987, Mesozoic foreland deformation and paleogeography of the western Great Basin, Humboldt Range, Nevada [Ph.D. dissertation paper]: Evanston, Illinois, Northwestern University, 214.
- Johnson, M.G., 1977, Geology and mineral deposits of Pershing County, Nevada: Nevada Bureau of Mines and Geology Bulletin 89, 136.
- Lister, G.S. and Snoke, A.W., 1987, S-C mylonites: *Journal of Structural Geology*, 6, 617-638.
- McKee, E.H. and Burke, D.B., 1972, Fission-track age bearing on the Permian-Triassic boundary and time of the Sonoma orogeny in north-central Nevada: *Geological Society of America Bulletin*, 83, 1949-1952.
- Nichols, K.M. and Silberling, N.J., 1977, Stratigraphy and depositional history of the Star Peak Group (Triassic), northwestern Nevada: *Geological Society of*

- America Special Paper 178, 73.
- Oldow, J.S., 1983, Tectonic implications of a late Mesozoic fold and thrust belt in northwestern Nevada: *Geology*, 11, 542-546.
- Peters, S.G., Nash, J.T., John, D.A., Spanski, G.T., King, H.D., Connors, K.A., Moring, B.C., Doebrich, J.L., McGuire, D.J., Albino, V.J., Dunn, V.C., Theodore, T.G. and Ludington, S., 1996, Metallogenic mineral resources in the U. S. Bureau of Land Management's Winnemucca District and Surprise Resource Area, northwest Nevada and northeast California: U. S. Geological Survey Open-File Report 96-712, 147.
- Ramsay, J. and Huber, M., 1987, The techniques of modern structural geology, Volume 2: Folds and fractures: Academic Press, 700.
- Robin, P.B., 1977, Determination of geologic strain using randomly oriented strain markers of any shape: *Tectonophysics*, 42, T7-T16.
- Russell, P.C., McKee, E.H. and Vikre, P.G., 1989, K-Ar ages from Nevada and eastern California: *Isochron/West*, 52, 12-14.
- Silberling, N.J., 1973, Geologic events during Permian-Triassic time along the Pacific margin of the United States, in Hills, L.V., ed., Permian and Triassic systems and their mutual boundary: *Canadian Society of Petroleum Geologists*, 2, 345-362.
- Silberling, N.J., 1991, Allochthonous Terranes of Western Nevada, Current Status, in Raines, G.L., Lisle, R.E., Schafer, R.W. and Wilkinson, W.H., eds., *Geology and Ore Deposits of the Great Basin Symposium Proceeding*: Geological Society of Nevada, Reno, Nevada, 101-102.
- Silberling, N.J. and Tozer, 1968, Biostratigraphic classification of the marine Triassic in North America: *Geological Society of America Special Paper* 110.
- Silberling, N.J. and Wallace, R.E., 1967, Geologic map of the Imlay quadrangle, Pershing County, Nevada: U. S. Geological Survey Geological Quadrangle Map, GQ-666, scale 1:62,500.
- Silberling, N.J. and Wallace, R.E., 1969, Stratigraphy of the Star Peak Group, Triassic, and over-lying lower Mesozoic rocks, Humboldt Range, Nevada: U. S. Geological Survey Professional Paper 592,50.
- Speed, R.C., 1978a, Basinal terrane of the Early Mesozoic marine province of the Western Great Basin, in Howell, D.G. and McDougall, K. A., eds., *Mesozoic Paleogeography of the Western United States: Pacific Coast Paleogeography Symposium 2*, 237-252.
- Speed, R.C., 1978b, Paleogeographic and tectonic evolution of the Early Mesozoic marine province of the western Great Basin, in Howell, D.G. and McDougall, K.A., eds., *Mesozoic Paleogeography of the Western United States: Pacific Coast Paleogeography Symposium 2*, 253-270.
- Stewart, J.H., 1980, *Geology of Nevada*: Nevada Bureau of Mines and Geology Special Publication 4, 136.
- Stewart, J.H. and Carlson, J.E., 1978, Geologic map of Nevada: U. S. Geological Survey, scale 1:500,000.
- Vikre, P.G., 1981, Silver mineralization in the Rochester district, Pershing County, Nevada: *Economic Geology*, 76, 580-609.
- Vikre, P.G. and McKee, E.H., 1985, Zoning and chronology of hydrothermal events in the Humboldt Range, Pershing County, Nevada: *Isochron/West*, 44, 17-24.
- Wallace, R.E., Silberling, N.J., Irwin, W.P. and Tatlock, D.B., 1969a, Geologic map of the Buffalo Mountain quadrangle, Pershing and Churchill Counties, Nevada: U. S. Geological Survey Geological Quadrangle Map, GQ-821, Scale 1: 62,500.
- Wallace, R.E. and Tatlock, D.B., 1962, Suggestions for prospecting in the Humboldt Range and adjacent areas, Nevada, in *Geological Survey Research 1962*: U. S. Geological Survey Professional Paper 450-B, B3-B5.
- Wallace, R.E., Tatlock, D.B., Silberling, N.J. and Irwin, W.P., 1969b, Geologic map of the Unionville quadrangle, Pershing County, Nevada: U. S. Geological Survey, Geological Quadrangle Map, GQ-820, scale 1:62,500.
- Whitebread, D.H., 1994, Geologic map of Dun Glen quadrangle, Pershing County, Nevada: U. S. Geological Survey Miscellaneous Investigations Map 1-2409, scale 1:48,000.

(책임편집 : 나기창)

(1999년 9월 25일 접수, 1999년 10월 31일 수리)

Structural characteristics of Humboldt Range, northwest Nevada, U. S. A.

Sangwon Cheong

Department of geological sciences, Mackay school of Mines
University of Nevada, Reno, Reno, Nevada, U. S. A.

Abstract : Characteristic and complex structures in the northwest Nevada, U. S. A. are developed due to relative tectonic movement of major tectonostratigraphic terranes. The research area is composed of autochthonous rocks of both the Early Triassic Koipato Group and Middle Triassic Star Peak Group, which is located in the Humboldt Range, northwest Nevada, U. S. A. The present research is focused on deformation history, related fabric development, and state of regional paleostress during the Jurassic to Late Cretaceous. The Triassic autochthonous rocks in the Humboldt Range, Nevada, U. S. A. display polyphase deformation due to E- to ESE-directed tectonic transport of the Fencemaker allochthon over autochthonous rocks of the Humboldt Range. Structures involving the Mesozoic foreland deformation are development of intense foliation, different styles of folds, minor thrusts, transposed layering, and strong mylonitization. These tectonic structures are mostly developed along the western flank of the Humboldt Range, and are reported as the first deformation of the Mesozoic foreland in the Humboldt Range, Nevada, U. S. A. Regional principal stress(σ_1) is interpreted to be E to ESE between the Jurassic and Early Cretaceous on the basis of orientations of strongly developed D_1 structures. The deformation during the Middle to Late Cretaceous, is characterized by development of consistent N- to NNE-trending metamorphic quartz veins, and shear zones parallel to pre-existing D_1 foliation. Orientations of metamorphic quartz veins as well as other kinematic indicators are N to NNE and are interpreted as those of regional principal stress(σ_1) during the Late Cretaceous. The sense of shear applied in the Humboldt Range is dextral and is caused by reactivation of early-formed D_1 structures. These results reflect counterclockwise rotation of regional principal paleostress in the Humboldt Range from the Jurassic to Late Cretaceous. Finally, development of both shear band cleavage and S/C mylonitic fabrics indicates that the shear zones in the Humboldt Range reflect involvement of enhanced non-coaxial flow during bulk shortening in mylonitic formation.

Key words : Humboldt Range, Fencemaker thrust, Transposed layering, Mylonite, Regional principal compressive stress.