

定量的 解析에 依한 咸白向斜 構造 研究

朴 麟 植* · 閔 庚 德*

Quantitative Analysis on the Structure of Hambaek Syncline

Rin Sik Park* · Kyung Duck Min*

Abstract: A geologic structure could be formed through various processes, because there are a number of factors which control the deformation of the Earth's crust. In geology, we could call it geological epistemology to describe exactly a geologic structure, and call it geological logics to infer logically the deforming process through which the geologic structure had been formed. Degree of legitimacy of geological logics depends upon the degree of exactness of geological epistemology.

This study described quantitatively 3-dimensional Hambaek Syncline through computer analysis, and examined qualitatively into its deforming mechanism based on the results of 3-dimensional analysis of the structure. Input data for the computer analysis are dips and dip directions of bedding planes of the structure.

The Hambaek Syncline disclose a minor fold group of NE-SW or NNE-SSW trend and a large scale fold of E-W trend.

The conclusions of this study are as follows:

- (1) The fold of E-W trend is primary fold (F_1) and the minor fold group of NE-SW or NNE-SSW trend secondary fold (F_2).
- (2) Hambaek Syncline is cylindrical type fold.
- (3) Apparent axial trace of Hambaek syncline does not coincide with true axial trace. The apparent axial trace is $N70^\circ-80^\circ W$ in Gohan and Sabuk area, and changes to $N70^\circ-80^\circ E$ in the westward of the area, while the true axial trace is $N40^\circ-70^\circ W$ in the former, and $N60^\circ-80^\circ E$ in the latter area.
- (4) Westward dipping of axial plane of the minor fold group of NE-SW or NNE-SSW trend can be attributed to simple shear movements along overthrusts.
- (5) Angle between axial trace and the directional trace of the maximum principal compressive stress (σ_1) may not be perpendicular each other.

The angle between them is governed by the following factors;

- 1) the plunge of fold axis 2) the dip of axial surface 3) cylindricity
- (6) The mean axial trace of Hambaek Syncline (F_1) is $N45.6^\circ W$, and the directional trace of σ_1 is $N52.4^\circ E$.
- (7) The mean axial trace of the minor fold group of NE-SW or NNE-SSW trend (F_2) is $N21^\circ E$, and the directional trace of σ_1 is $N22^\circ W$.

1. 서 론

지각은 끊임없이 변형되고 있다. 이러한 지각 변형을 좌우하는 요소는 confining pressure, 응력상태, strain rate, 온도, 시간, pore pressure, pore solution, 이방성과 비균질성, 점성, 공극률등 수많은 변수를 가지고 있으며 특히 변형되는 동안에도 응력상태, 변형상태 및 암석자체의 물리적 성질이 변하기 때문에 변형된 현상으로부터 그 현상의 형성과정을 역학적으로

규명하기는 어렵다. 따라서 구조 지질학에서는 동일과정의 법칙도 그 실제성이 결여된다고 할 수 있겠다. 그렇기 때문에 구조 지질학에서는 지질현상이 어떠한 과정을 통해서 형성되었던 현재의 고유한 구조를 정확히 알아내는 것이 중요하며 이를 통하여 그 형성 과정을 규명시키는 것이 바람직하다.

본 연구는 이러한 관점에서 함백향사를 대상으로 하여 먼저 정량적으로 구조를 해석하고자 하였다.

지질학에서 mapping이란 3차원적인 입체구조를 2차원적인 평면에 옮기는 것이다. 이에 따르는 한계성

*연세대학교 지질학과

을 보완하기 위해서 약정된 기호를 사용하고는 있지만 3차원으로부터 2차원으로 변환되는 과정에서 어떤 요소는 결여될 수가 있으며, 따라서 2차원 도면으로부터 본래의 3차원 원형을 재현시키는 데는 오류가 있을 수 있다. 즉, 지질도, 지질구조도, 지질단면도로는 규명해 낼 수 없는 입체적인 성질의 것이 있을 수 있다는 것이다. 특히, 지질구조의 역학적 해석과정에서 습곡축과 최대응력의 방향과의 관계 결정에서 이러한 문제점은 야기되기 쉽다. 이와같은 문제점은 정량적인 3차원적 구조해석을 통하여 해결될 수 있다. 정량적 구조해석 방법은 Agterberg (1961)에 의해 처음으로 이태리의 Gosaldo 지역의 소습곡 구조에 대해 습곡축을 방향여현의 향으로 바꾸어 구조해석에 이용됨으로써 이러한 방법이 구조해석에 매우 유용하다는 것이 밝혀졌다.

Loudon (1963, 1964)은 습곡면이나 습곡축과 같은 구조요소(fabric element)를 방향여현의 향으로 대치하여 선형대수(linear algebra)의 방법을 구조지질학에 적용하였는데 이는 구조지질학에 상당한 발전을 가져왔다.

입체해석기하의 원리를 지질학적 mapping에 적용하는 문제는 유클레이데스 변환군 내에서 가능하지만 많은 자료처리의 난점이 있었는데 이를 전자계산기가 담당함으로써 지질구조의 3차원적인 정량적 구조해석이 가능해졌으며 국내에서는 아직까지 이러한 방향으로 연구된 바가 없다.

본 연구의 대상지역인 함백향사 일대에 대한 지질조사는 일본인 素木卓二(1930)가 처음 실시한 이래 태백산 지구 지질조사단(1961), 유익규·구자학(1964), 손치무·경창희(1965), 윤석규(1966), 남원희(1968), 손치무·김형식(1969), 경창희(1969), 강필중(1977) 등에 의해 활발히 이루어졌다. 또한 자원개발 연구소에서는 1977년도에 삼척탄전에 대한 정밀조사를 실시한 바 있다.

함백향사는 동서 방향의 대규모의 주습곡과 북동—남서 방향의 소습곡군 등 2개의 뚜렷한 구조방향을 나타내는 북향사이다. 동서방향의 주습곡의 습곡축은 전체적으로 북북 N85°W(손치무·경창희: 1965)이며 측면이 약 70°내외로 북경(남원희: 1968)하고, 서쪽에서 동쪽으로 기울고 있으며 pitch는 약 15°(유익규·구자학: 1964)라는 종전의 연구결과는 일반적으로 받아들여지고 있다. 그러나 두방향의 습곡에 대한 선·후 관계에 있어서는 의견이 엇갈리고 있다. 즉, 김옥준(1970, 1973), 손치무(1969) 강필중(1977) 등은 동서방향의 함백향사 구조가 N30°E 방향의 습곡구조보다 먼저

생성 되었다고 주장하고 있는데 반해 경창희(1969)와 자원개발연구소 삼척탄전 정밀조사보고(1979)는 이와는 반대로 동서 방향의 구조가 북동—남서 방향의 구조를 변형시켰다고 해석하고 있다.

본 연구를 위하여 첫째, 함백향사지역을 습곡축면의 주향과 경사의 변화 방향에 따라 경사 변화율이 가장 심한곳을 경계로하여 166개의 sub-area로 나눈뒤, 각 sub-area에 대한 분산행렬(dispersion matrix)을 구한 다음, 이 행렬의 고유치와 고유벡터를 구하기 위해서 Jacobian method를 이용한 computer program을 개발하였으며 아울러 이러한 선형대수 방법으로 부터 습곡축과 cylindrisity를 결정하는 program도 개발하였다. 둘째, 이렇게 해서 구한 고유치, 고유벡터 및 cylindrisity는 이 지역 습곡구조의 3차원적인 해석을 가능케 하였으며 이를 통해 상기한 두방향의 습곡구조의 선·후 관계를 밝히고 구조역학적으로 함백향사의 regional setting에 관한 문제도 고찰하였다. 끝으로, 함백향사 구조에 대한 정량적인 구조연구를 통하여 2차원적인 습곡구조 서술의 문제점 파악 및 3차원적인 구조해석의 의의 및 유용성을 규명코자 하였으며 이를 통해 앞으로의 우리나라 지질구조를 정량적으로 해석하고 체계화시키는 계기를 마련코자 하였다.

본 연구를 위한 기초 입력자료인 많은 양의 경사방향과 경사는 1979년도 자원개발연구소의 삼척탄전 정밀조사 시 측정된 것을 사용하였으며 이를 협조하여준 자원개발연구소측에 심심한 사의를 표하는 바이다.

2. 지질개요

2-1. 지질개요

본 지역에 분포하는 지층은 선캠브리아기의 변성암류, 캄브로—오도비스기의 조선계층, 석탄기—트라이아스기의 평안계층 그리고 백악기의 경상계층으로 구성되어 있다.

본 지역의 변성암류는 함백산 대단층 서단단에 분포하며 선캠브리아기의 태백산통의 일부분으로서 조선계층에 의해 부정합으로 덮힌다.

조선계층군은 양덕층군과 대석회암층군으로 나뉘며 본역의 대석회암층군은 대부분 막동 석회암층이다.

평안계층군은 석탄기의 만항층, 금천층, 폐름기의 장성층, 함백산층, 도사곡층, 고한층 그리고 트라이아스기의 동고층으로 세분된다(1979, 자원개발연구소 삼척탄전 정밀지질조사보고서).

대석회암층을 평행 부정합으로 덮고 있는 만항층은 녹회색 세일과 사암으로 특징지워진다.

금천층은 흑색—암회색 세일이 우세하며 흑색—회색

사암과 3-4 매의 암회색 석회암의 박층을 협제한다. 본층은 상위 지층인 장성층에 의하여 거의 평행 부정 함으로 덮히며 함백광업소 지역에서는 결층되어 장성 층이 만항층을 직접 덮고 있다.

장성층은 대체로 암회색 내지 흑색 사암과 셰일로 구성되며 1매의 주탄층 내외에 3-4매의 탄층을 협제 한다.

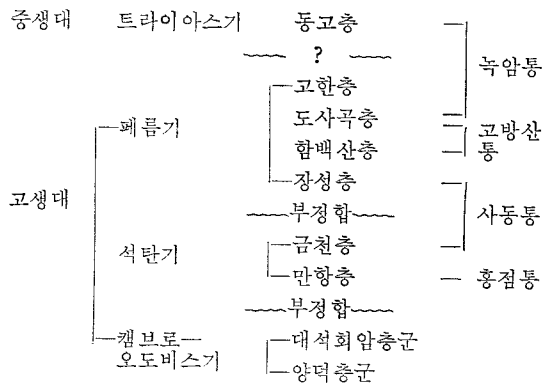
함백산층은 주로 우백색 조립사암으로 구성되고 드 물게 흑색내지 암회색 셰일을 수매 협제한다. 본 층 사 암중에는 사층리가 현저하게 발달됨이 특징적이다.

도사곡층은 함백산층을 정합적으로 덮고 있으며 주 로 담회색 및 담녹색의 조립사암과 극 조립사암이 우 세하다. 일반적으로 도사곡층의 사암은 함백산층 사암 보다 조립이며 분급이 불량하고 기질의 양이 많아 느 슨한 느낌을 준다.

고한층은 도사곡층을 정합적으로 덮고 있으며 회색 내지 녹색, 암녹색 또는 흑색의 셰일과 회색내지 녹 회색의 조립 내지 중립 사암으로 구성되며 석회질물을 함유한다. 그러나 셰일의 경우 적색을 띠는 것도 곳에 따라 발견되며 사암 역시 곳에 따라 조립 또는 역질로 나타나는 것들이 있다.

동고층은 대부분 조립내지 중립의 장석질 사암으로 구성되며 하부에 적색조립 사암이 협제된다. 본층의 하부에는 녹색 및 적색 셰일 박층이 약간 협제하나 상 부로 갈수록 협제 빈도수가 적어진다.

지 질 계 통 표



2-2 지질구조

2-2-1 지질구조 : 함백 대단층의 서부에 위치한 본 지역의 지질구조는 크게 북동-남서 내지 남-북 방향 과 동서 방향등 2개의 구조적 방향으로 나뉘어진다. 북동-남서 방향의 구조에는 주로 N10°-50°E 방향의 습곡군 및 이에 수반된 역단층과 N10°-30°E 방향의 정 단층들이 포함되며, 등-서 방향의 구조적 방향에는

함백향사를 비롯하여 N70°-90°E 방향의 역단층으로 이루어졌다.

2-2-2 지금까지 연구된 결과 : 본 지역의 지질구조에 대한 유의규·구자학(1964)의 연구결과는 함백향사의 축은 N80°W로 바닥층은 북편하며 향사의 북익은 수 직-50° 내지는 역전에 가까운 급경사를 시현함에 반 하여 남익은 30°N 또는 NE 내외의 완경사를 보인다. 동부에 비하여 서부로 갈수록 습곡이 심하며 서측에서 동측으로 기울고 있는데 pitch는 약 15°를 보인다. 그러므로 본 향사의 바닥은 서부에서 동부로 갈수록 심 도가 크다. 특히 함백지역에서는 N40°E 축을 갖는 소 습곡의 지배적이다. 또 이들 대·소 습곡에 수반하여 많은 단층이 NNE-SSW 방향 또는 N70°-80°W 방향으 로 발달한다고 밝혔다.

그 뒤 손치무·정창희(1965)는 본 향사를 일종의 북 향사로 보았다. 축의 방향을 전체적으로 볼때 N85°W 이지만 본 향사의 서쪽 부근에서는 N70°E 이고 동쪽부 근인 함백산 단층 부근에서는 N85°W 이며 중앙부근에 서는 N65°W 이라고 밝히고 있다. 아울러 본 향사에는 주축 방향에 따르는 북 습곡이 발달되어 있을뿐 아니 라 이습곡 방향에 사교하는 습곡이 발달되어 있으며, 이들 중 EW 방향의 습곡이 먼저 생성되었고 N30°E 방향의 습곡이 가장 후기에 생성되었다고 밝히고 있다.

남원희(1968, 광진)는 함백향사는 그 축면이 약 70° 내외로 북경하고 있어 본 지역의 최심부는 중앙부 보 다 훨씬 북부일 것이라고 보았다.

정창희(1969)는 강원도 삼척탄전의 층서 및 고생물 (1)에서 북동-남서 방향의 습곡이 먼저 생성 되었고 후기에 함백향사가 생성되었다고 보았다.

김옥준(1970)은 함백향사등 인접한 경선분지, 중봉 산배사, 소백산배사, 울리분지 등을 포함해서 다음과 같이 밝혔다. 즉, 경선분지와 중봉산배사는 대단히 복잡한 doubly plunging 하는 북향사와 북배사이고 다른 습곡들은 방향성이 뚜렷한 북 배향사이다. 이들의 습 곡축은 동부에서 N70°-80°W의 방향을 보이고 서부로 가면서 만곡하여 NE-SW 방향 즉 옥천 고지향사 대의 그것과 평행하다. 이와같은 N70°-80°W의 습곡은 대보 조산운동 이전에 형성된 것이다. 또한 대동계의 지층 이 NE-SW 방향으로 분포되는 것으로 보아 선대동계 이다. 습곡대의 지층 중 가장 먼저인 것은 평안계의 녹암통이므로, 이습곡시기는 후평안계-선대동계이며 따라서 송림 변동시기인 트라이아스 말기인 것으로 추 측된다고 밝히고 있다.

1979년 KIGAM에서 실시한 삼척탄전 정밀조사에 의 하면, 대체로 북동-남서 방향의 구조선이 E-W 방향

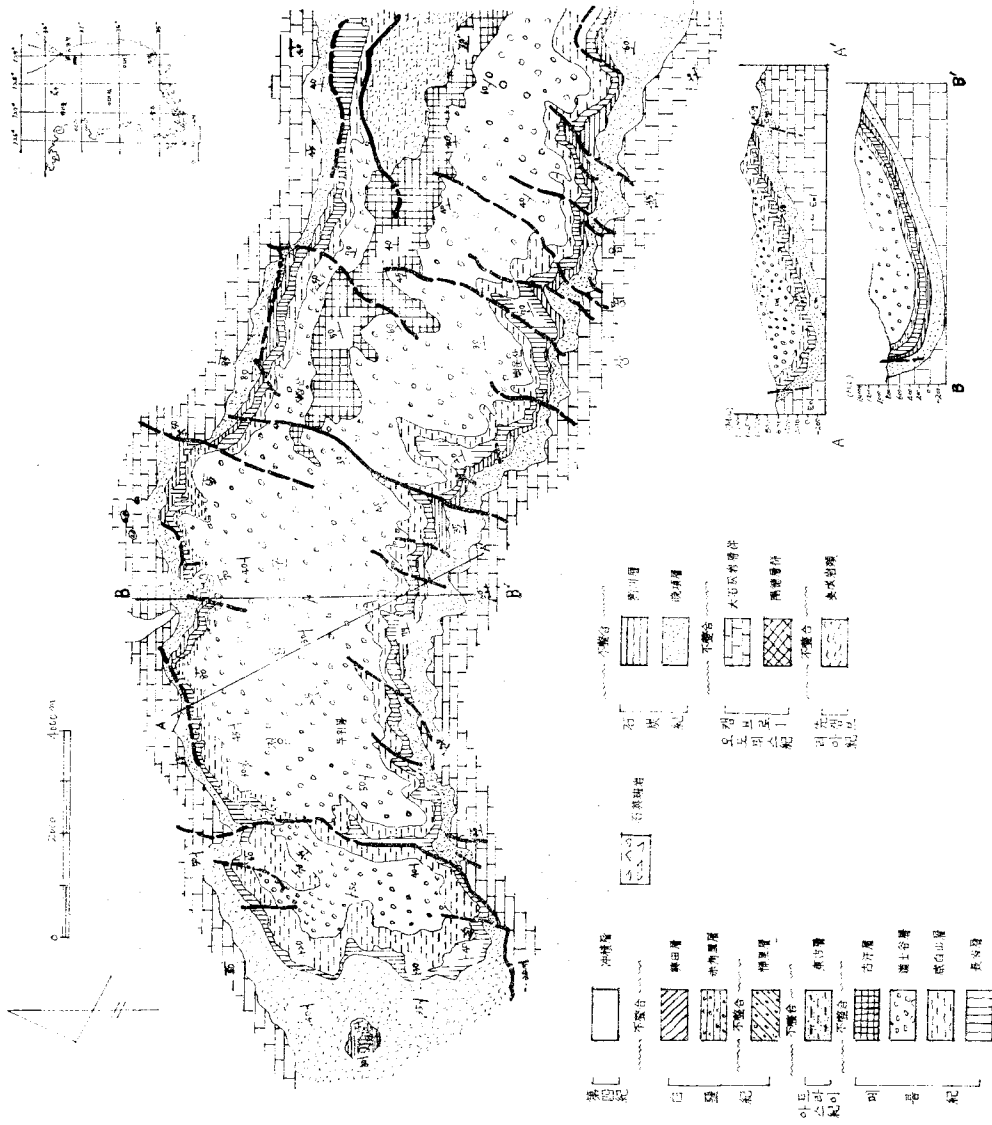


Fig. 1 Geologic map around the Baegunsan area (After KIGAM, 1979) and geologic section drawing up through computer analysis (B-B')

의 것보다도 우세하게 발달하고 있지만 이들 구조의 상호관계를 고려해 볼때 북동-남서 방향의 구조선이 동서 방향의 것에 의하여 변형되어 있으므로 NE-SW 방향의 구조선이 일어난 후 함백항사를 비롯하여 기타 동서 방향의 과습곡 및 역단층이 형성되어 이들을 변형시켰으며 최후에 남북 방향의 정단층이 형성되었다고 밝히고 있다.

3. 습곡구조의 정량적 해석

3-1. 방향여현을 이용한 분산 행렬

야의조사에서 측정된 습곡층의 경사와 경사방향은 U, V, W 직각 좌표계에 위치시킬 수 있다(Fig. 2). 이 좌표계에 선형구조 요소는 이와 평행한 단위 벡터로, 면요소는 그면에 수직한 단위 벡터로 표시가 가능하다.

습곡층면의 경사 방향을 α , 경사를 β 라 하면 Fig. 2에서 보는 바와같이 습곡층 면의 unit normal vector의 방향여현 p, q, r 은 다음과 같다.

$$p = -\cos\alpha \sin\beta; q = \sin\alpha \sin\beta; r = \cos\beta \quad \text{--- (1)}$$

α 와 β 가 N개의 습곡층 면에서 측정되었을 경우 이들의 각각의 방향여현 항으로 다음과 같은 행렬을 만들 수 있다(Loudon, 1964).

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\sum_{i=1}^N p_i^2}{N} & \frac{\sum_{i=1}^N p_i q_i}{N} & \frac{\sum_{i=1}^N p_i r_i}{N} \\ \frac{\sum_{i=1}^N q_i p_i}{N} & \frac{\sum_{i=1}^N q_i^2}{N} & \frac{\sum_{i=1}^N q_i r_i}{N} \\ \frac{\sum_{i=1}^N r_i p_i}{N} & \frac{\sum_{i=1}^N r_i q_i}{N} & \frac{\sum_{i=1}^N r_i^2}{N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad \text{--- (2)}$$

행렬 A는 습곡층면의 수직방향에 대한 습곡정도를 나타내는 분산 행렬이다. 이 행렬로부터 다양한 변화를 보이는 습곡 구조에 대해서도 그 습곡의 축이나 습곡의 대칭성을 규명해 낼수 있다. 이러한 축은 수리물리학에서 기본축(principal axis)을 찾아내는 방법에 의해 구한다(Harman, 1960; Kendall, 1961).

3-2. Sampling 방법

본연구에 사용된 자료는 습곡층면의 경사 방향과 경사이다. 자료의 효율적인 통계처리를 위해서 연구대상 지역을 구조적 성질을 단위로 하여 여러개의 대(帶)로 나누었다. 즉, N-S, NE-SW 방향의 소습곡군과 E-W 방향의 주습곡으로 크게 둘로 나뉘어 처리하였다.

각대(帶)의 size는 자료의 동방성과 이방성에 미치는

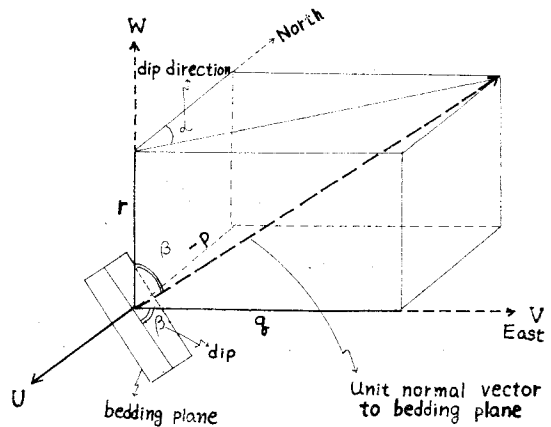


Fig. 2 Directional cosine of unit normal vector to bedding plane

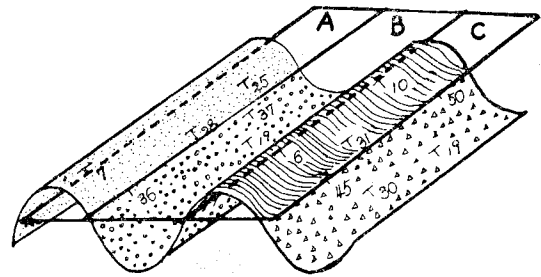


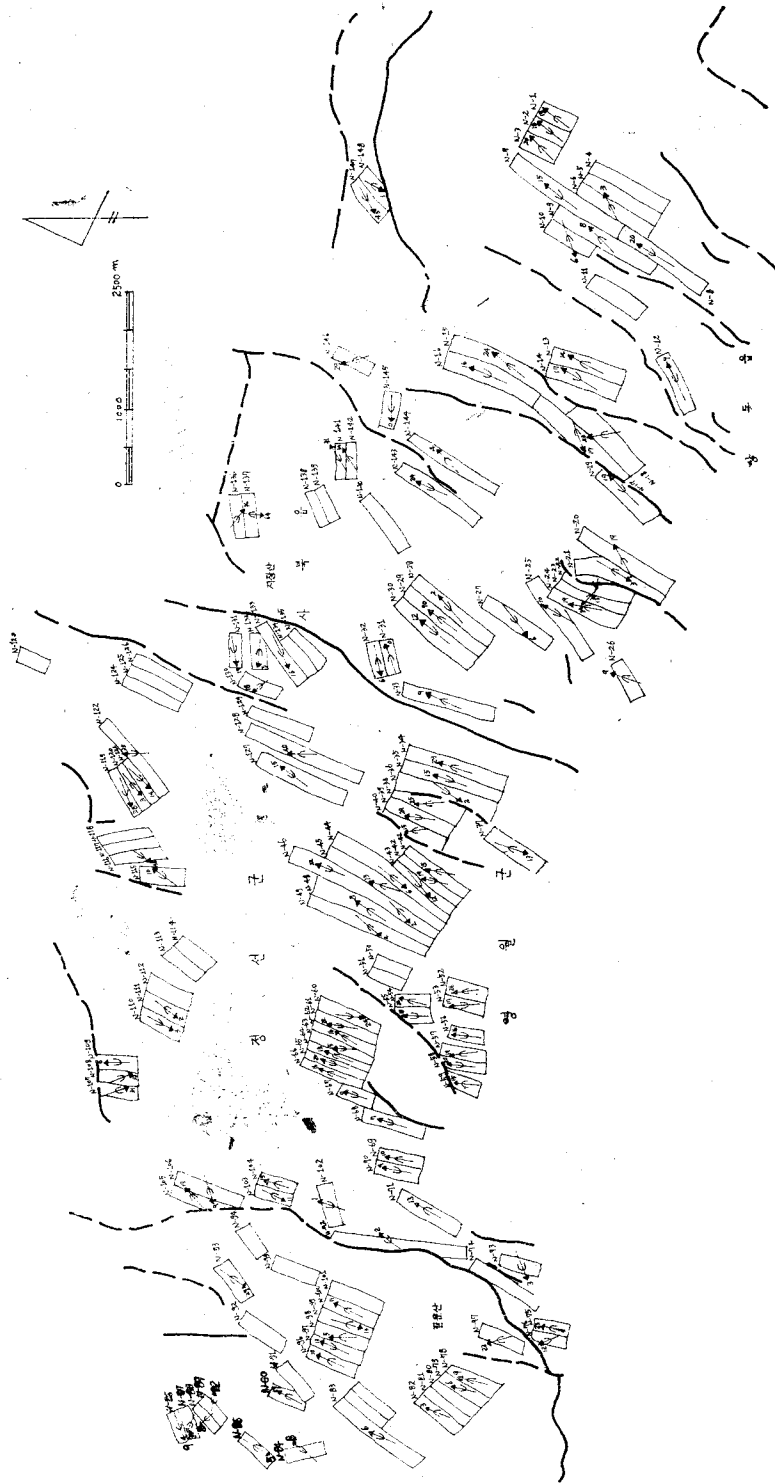
Fig. 3 Size of sub-area

영향이 크다. 즉, size가 크면 동방성이 되고 size가 작으면 이방성이 된다. Weiss (1959 A)는 구조요소(structural element)를 연구하는 어떤 대상 지역에서 구조의 균질성은 size에 반비례한다고 주장했다. 그러므로 어떤지역에서 구조적으로 높은 균질성을 얻기 위해서는 그 지역을 좀더 작은 구간으로 나누어야 한다. 본 연구에서는 상기 두 대(帶)를 다음과 같이 sub-area로 세분하였다.

소습곡군 : 습곡면의 주향과 경사의 분포가 Fig. 3과 같을 경우, sub-area를 평균 주향의 방향으로 경사가 가장 커지는 곳을 경계로하여 A, B, C 등으로 나누었다. 따라서 각 sub-area는 습곡운동이 일어나기 전의 퇴적면을 기준으로 할 때 개개의 요철 부분에 해당된다.

이와 같은 방법으로 소습곡군에 대하여 148개의 sub-area를 설정하여 자료를 수집처리하였다(Fig. 4).

주습곡 : 함백항사는 습곡축을 경계로 남북으로 각층



· i . 4 Sub-area and axial trace of folded axes drawing up through computer analysis.



Fig. 5 Sub-area of E-W trending fold

들이 대칭으로 분포하고 있다. 즉, 본 항사의 중앙부로부터 등고층, 고한층, 도사곡층, 함백산층, 장성층, 금천층, 만항층, 대석회암층 등이 남북으로 대칭적으로 분포한다.

이러한 각층의 쌍을 하나의 sub-area로 정하여 18개의 sub-area에 대한 자료를 수집처리하였다(Fig. 5).

3-3. 고유치와 고유벡터

분산행렬 A의 대각선 항을 제외한 나머지항을 전부 zero로 제거시킨 행렬을 D라고 하면,

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

가 되며 D의 대각선 항 d_{11} , d_{22} , d_{33} 는 분산 행렬 A의 고유치이다.

다음에

$$R = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

로 두면 행렬 R의 transpose 행렬 R^T 는

$$R^T = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

가 된다.

만약 행렬 R과 R^T 가 $RAR^T = D$ 의 조건을 만족시킨다면 R^T 는 행렬 A의 고유벡터가 된다.

3-3-2 고유치와 고유벡터의 기하학적 의미: 세계의 고유치 d_{11} , d_{22} , d_{33} 는 ellipsoid의 세 기본축의 길이이며, 고유벡터는 세 기본축의 방향을 나타낸다. 그리고 분산행렬 A는 고유치와 고유벡터로 만들어진 ellipsoid 표면상의 3점의 좌표를 나타낸다.

습곡의 세기본축 A_1 , A_2 , A_3 를 정의하면,

Fig. 6에서 보는바와 같이 A_1 축은 원점과 hinge를 연결한 축이며, A_2 축은 습곡축, 그리고 A_3 축은 A_1 과 A_2 가 이루는 면에 수직인 축이다.

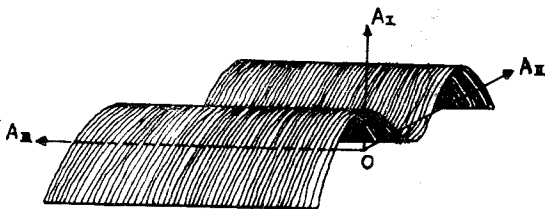


Fig. 6 3-principal axes of folded structure

지금 분산행렬

$$A = \begin{pmatrix} 33 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 67 \end{pmatrix} \quad (6)$$

인 경우 고유치는 $d_{11}=67$, $d_{22}=33$, $d_{33}=0$ 이고,

고유 벡터행렬

$$R^T = \begin{pmatrix} 9 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \\ 100 & -9 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

이다.

그림 7에서 좌우축을 U, 상하축을 W, 그리고 노트면에 수직인 방향으로 V축을 잡으면 A_1 축은 원점과 점 (9, 0, 100)을 지나는 축이고, A_2 축은 원점과 점 (100, 0, -9)을 지나는 축이며, A_3 축은 원점과 점 (0, 100, 0)을 지나는 축이 된다.

strain ellipsoid는 고유치 d_{33} 가 zero이기 때문에 장축과 단축이 각각 $d_{11}=67$ 및 $d_{22}=33$ 인, U-W 평면상에서의 ellipse가 되며 B, C점의 좌표는 분산행렬 A에서 첫번째행과 세번째행으로 주어진다.

Ellipse 상에서 원점 O에 대칭인 점 B', C'를 구하면 호 B'C'는 이 습곡의 단면이 된다.

이와같이 구해낸 습곡 구조를 지구 방위에 정지시켜

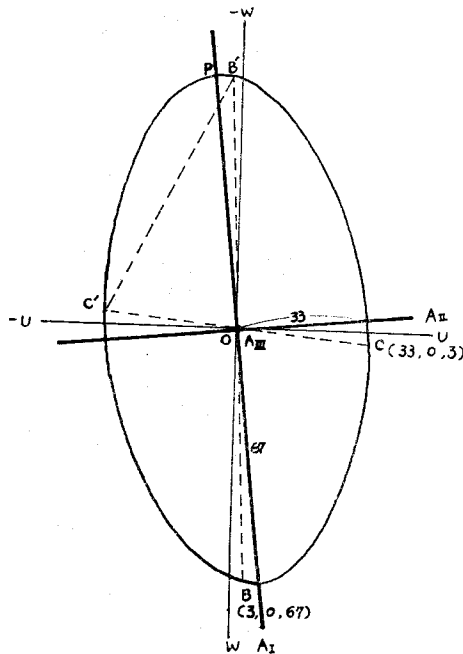


Fig. 7 Geometric meaning of eigen value and eigen vector

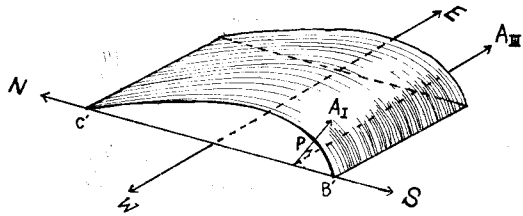


Fig. 8 Structural section driven from eigen value and eigen vector

도시하면 Fig. 8과 같다. 이 그림에서 $\widehat{B'C'}$ 는 N-S 방향의 습곡단면이 되며 습곡 축, 즉 A_{III} 축은 V축과 평행하게 되므로 E-W방향이 된다.

3-3-2. 고유치와 고유벡터의 구조지질학적 의미 : 고유치 d_{11}, d_{22}, d_{33} 를 $d_{11} > d_{22} > d_{33}$ 의 순으로 배열하면 이들의 구조 지질학적 의미는 다음과 같다.

(1) R^T 는 분산행렬 A의 고유벡터 행렬이며 R^T 의 세 개의 열은 각 기본축의 방향 여현이다.

(a) b_{11}, b_{21}, b_{31} 은 A_I 축의 방향여현이며 이는 습곡 층면(So)에 대한 수직선들의 평균 공간위치가 된다. 이에 대응하는 고유치 d_{11} 은 A_I 축에 평행한 방향으로의 습곡된 정도이다.

(b) b_{12}, b_{22}, b_{32} 는 A_{II} 축과 A_I 이 이루는 면과 직교하는 A_{II} 축의 방향여현 이고 이에 대응하는 고유치 d_{22} 는 A_{II} 축에 평행한 방향으로의 습곡된 정도이다.

(c) b_{13}, b_{23}, b_{33} 는 A_{III} 축(습곡축)의 방향여현이고, 이에 대응하는 고유치 d_{33} 는 A_{III} 축에 평행한 방향으로의 습곡된 정도이다.

(d) A_I 축과 A_{III} (습곡축)이 이루는 면이 습곡층면(axial plane)이 된다.

(e) Similar type의 습곡은 항상 maximum principal compressive stress (σ_1)에 대하여 수직으로 축면이 놓이며 (De Sitter, 1954) 임의의 한점에서의 σ_1 의 방향은 결코 하나 이상 있을 수 없다(Nadai, 1950). 따라서 σ_1 의 방향에 수직인 축면을 갖는 습곡은 한개뿐이다(J. G. Ramssay, 1992).

그러므로 A_I 축과 A_{III} 축이 이루는 축면(axial plane)에 수직인 A_{II} 축은 compressive stress (σ_1)의 방향이 된다. 이에 해당하는 고유치 d_{22} 는 A_{II} 축과 직교하는 평면내에서 특히 A_I 축과 평행한 방향으로의 습곡된 정도를 나타낸다(Fig. 9).

Fig. 9에서

0; 3-dimensional reference point

$0', 0''$; 2-dimensional reference point on the V-W plane and U-V plane

A, A' ; $\pm(0, a_{32}, a_{33})$

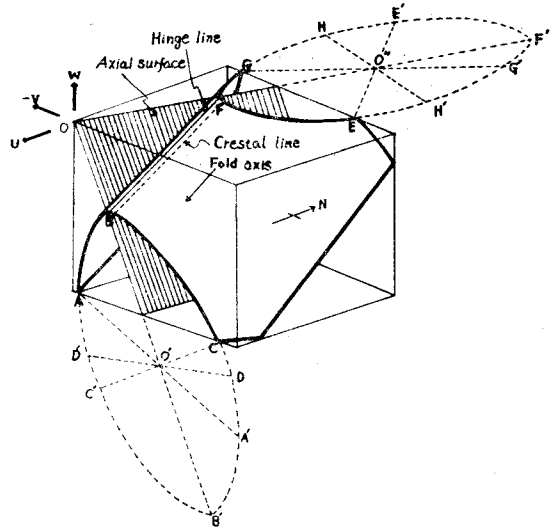


Fig. 9 Relationship between dispersion matrix, eigen value, eigen vector and 3-dimensional model of folded structure

$$\begin{aligned} \overline{BB'} &= \overline{0'(0, b_{21}, b_{31})} & \overline{FF'} &= \overline{0''(b_{11}, b_{21}, 0)} \\ \overline{0'B} : \overline{0'D} &= d_{11} : d_{22} & \overline{O'F} : \overline{O'H} &= d_{11} : d_{22} \\ C, C'; \pm(0, a_{22}, a_{23}) & & G, G'; \pm(a_{11}, a_{12}, 0) & \\ \overline{DD'} &= \overline{0'(0, b_{22}, b_{32})} & \overline{HH'} &= \overline{0''(b_{12}, b_{22}, 0)} \\ E, E'; \pm(a_{21}, a_{22}, 0) & & \text{Fold axis; } \overline{0(b_{13}, b_{23}, b_{33})} & \end{aligned}$$

이다.

(2) 고유벡터 행렬 R^T 는 좌표축(U, V, W)의 기본축(A_I, A_{II}, A_{III})에 대한 회전에 의한 변환행렬(transformation matrix)이다.

(a) 어떤 특정한 So면에 대해서 이 So면에 직교하는 단위벡터의 좌표축에 대한 방향여현을 각각 p, q, r 이라하고 기본축에 대한 방향여현을 p', q', r' 이라 하면

$$(pqr) R^T = (p' q' r') \dots \dots \dots (8)$$

가 된다.

(b) 따라서 좌표계(U, V, W)와 기본축(A_I, A_{II}, A_{III}) 사이에는

$$(UVW) R^T = (A_I A_{II} A_{III}) \dots \dots \dots (9)$$

의 관계가 있다.

고유치와 고유벡터를 구하는 방법 : 고유치와 고유벡터를 구하는 방법에는 여러가지가 있다. 행렬 A에 해당하는 특성 방정식(characteristic equation) $\det(A - \lambda I) = 0$ 를 풀어서 고유치와 고유벡터를 직접구하는 방법도 있고 점진적으로 근사치를 반복적으로 구해내는

Jacobian method가 있는데 본 논문에서도 많은 자료 처리의 난점을 컴퓨터로 처리하기 위해 Jacobian method를 사용했다.

Jacobian method는 행렬 A를 본래의 좌표축에 대해 계속적으로 회전시켜 대각선항을 제외한 나머지 항을 제거시켜 행렬 D를 구해내는 방법이다.

수직축에 대해 θ 만큼의 회전은 행렬 A에 행렬 T를 곱한후 다시 T^T 를 곱하면 된다. 여기서 T는

$$T = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (10)$$

이며 따라서 T^T 는

$$T^T = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (11)$$

이다.

즉 행렬 A는 수직축을 회전축으로 하여 θ 만큼 회전시키면 TAT^T 가 된다.

N-S, E-W 축돌래를 회전시키면 T는

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \text{와} \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \dots \dots \dots (12)$$

가 된다.

이러한 연속적인 회전은 대각선 외부항을 점점 더 작게 만들어 결국은 없어지게 만들며 대각선 행렬(diagonal matrix)을 얻을수 있게 된다. 이리하여

$$T_k T_{k-1} \dots T_2 T_1 A T_1^T T_2^T \dots T_{k-1}^T T_k^T = D \dots \dots \dots (13)$$

가 되며 이를 간단히 쓰면

$$RAR^T = D \dots \dots \dots (14)$$

가 된다. 이때의 R^T 는 고유벡터 행렬이며 D는 고유치 행렬이다.

3-4. Cylindrisity 결정방법

Loudon (1964)은 원통형과 원추형 습곡을 구별해 내는 방법을 고안해 냈다.

i 번째 So 면에 대한 수직성분이 원래의 U, V, W 축에 대해 각각 p_i, q_i, r_i 의 방향여현을 가진다고 하자. 각 So 면의 수직 방향 단위 벡터를 Fig. 10에서 처럼 U, V, W 좌표계의 원점을 중심으로 하는 구면상에 투영시키면 그점은 So 면이 원통형 습곡면일 경우에는 대원상에오고, So 면이 원추형 습곡면일 경우에는 소원상에 올것이다.

습곡축이 구면상에 찍히는 점의 방향여현을 l, m, n이라 하면

$$p_i l + q_i m + r_i n = \cos \theta = k \dots \dots \dots (15)$$

의 방정식이 성립한다. 여기서 $\cos \theta = k$ 는 구의 중심

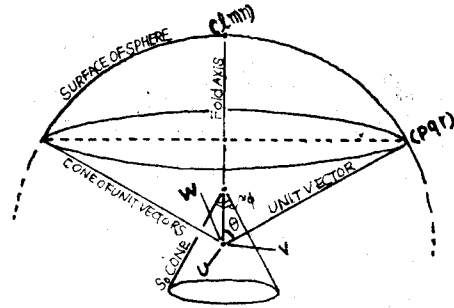


Fig. 10 A conical fold related to the orthogonal axes U, V, W.

으로부터 원까지의 거리이다.

원통형 습곡에서는 $\theta=90^\circ$ 이기 때문에 $k=0$ 이며, 원추형 습곡에서는 $\theta < 90^\circ$ 이므로 $k > 0$ 이다. Fig. 10에서 원추의 꼭대기 평면각 ϕ 는 $180-2\theta$ 도이다.

식 (15)로부터

$$p_i = \frac{k}{l} - \frac{m}{l} q_i - \frac{n}{l} r_i \dots \dots \dots (16)$$

이며 측정치(식 (16)의 좌변)와 계산치(식 (16)의 우변)의 차의 제곱의 합은 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^N (p_i \text{ observed} - p_i \text{ calculated})^2 = \sum_{i=1}^N \left(p_i - \frac{k}{l} + \frac{m}{l} q_i + \frac{n}{l} r_i \right)^2 \dots \dots \dots (17)$$

이 두 수치의 차의 제곱의 합이 최소 일때 가장 가까운 근사치를 구해낼수 있다. 위의 식을 $\frac{k}{l}, \frac{m}{l}, \frac{n}{l}$ 의 함수로 표시하고 $F\left(\frac{k}{l}, \frac{m}{l}, \frac{n}{l}\right)$ 를 최소화시키기 위해서는

$$\frac{\partial F}{\partial \frac{k}{l}} = \frac{\partial F}{\partial \frac{m}{l}} = \frac{\partial F}{\partial \frac{n}{l}} = 0 \dots \dots \dots (18)$$

이어야 한다. 그러므로

$$\frac{\partial F}{\partial \frac{k}{l}} = \sum_{i=1}^N 2 \left(p_i - \frac{k}{l} + \frac{m}{l} q_i + \frac{n}{l} r_i \right) (-1) = 0 \dots \dots \dots (19)$$

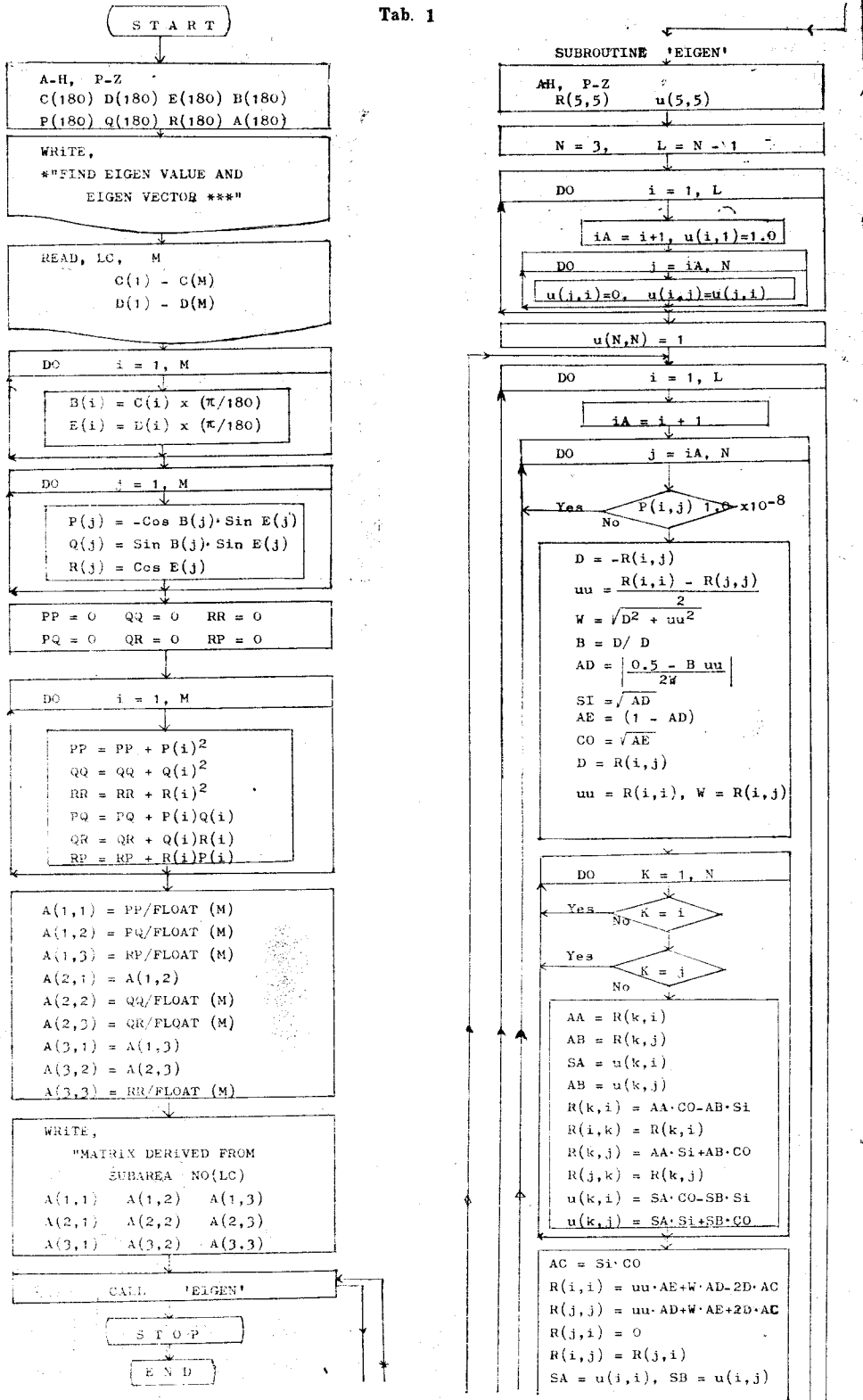
$$\frac{\partial F}{\partial \frac{m}{l}} = \sum_{i=1}^N 2 \left(p_i - \frac{k}{l} + \frac{m}{l} q_i + \frac{n}{l} r_i \right) (q_i) = 0 \dots \dots \dots (20)$$

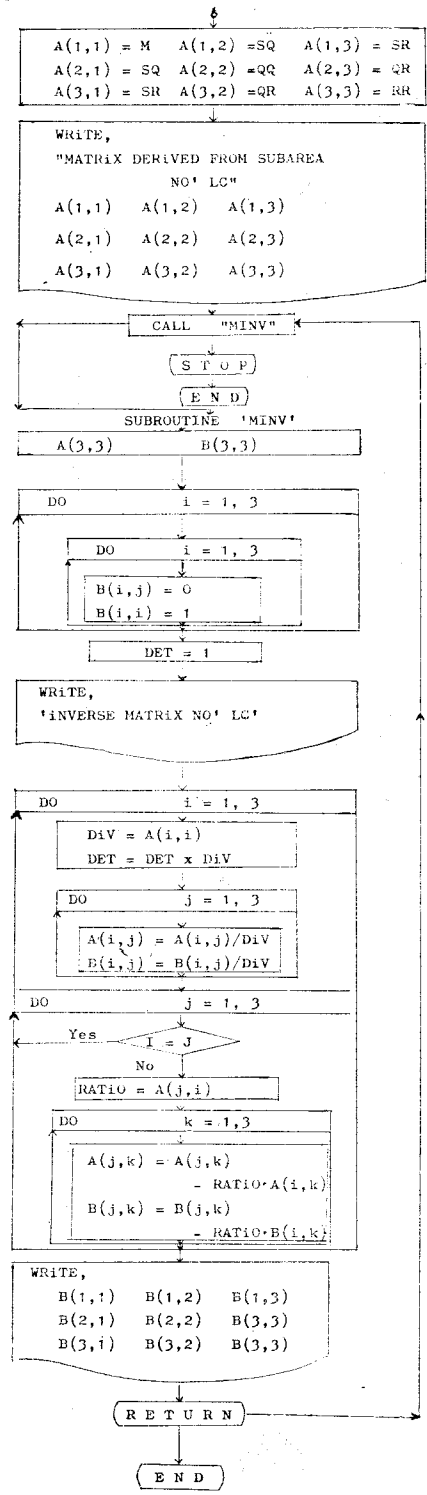
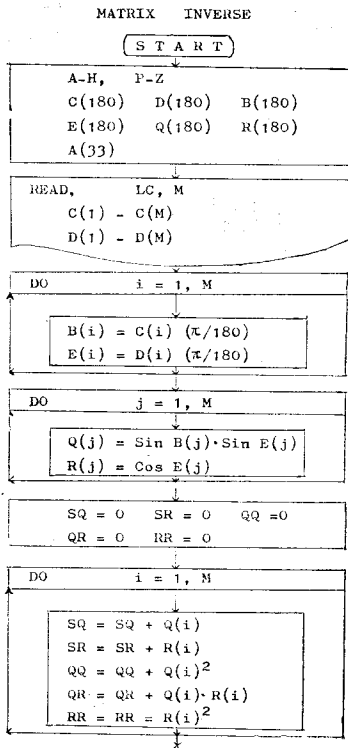
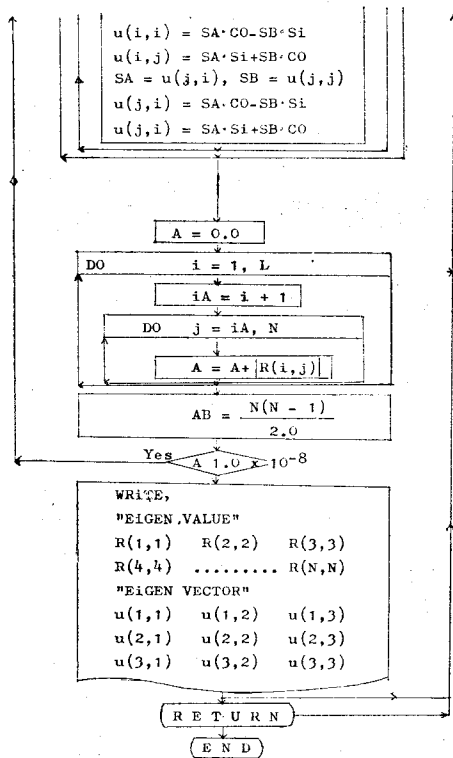
$$\frac{\partial F}{\partial \frac{n}{l}} = \sum_{i=1}^N 2 \left(p_i - \frac{k}{l} + \frac{m}{l} q_i + \frac{n}{l} r_i \right) (r_i) = 0 \dots \dots \dots (21)$$

이들 방정식을 행렬 방정식으로 쓰면

$$\begin{pmatrix} N & \sum q_i & \sum r_i \\ \sum q_i & \sum q_i^2 & \sum q_i r_i \\ \sum r_i & \sum q_i r_i & \sum r_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{k}{l} \\ -\frac{m}{l} \\ -\frac{n}{l} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum p_i \\ \sum p_i q_i \\ \sum p_i r_i \end{pmatrix} \dots \dots \dots (22)$$

Tab. 1





이다. 여기서

$$Q = \begin{pmatrix} N & \sum q_i & \sum r_i \\ \sum q_i & \sum q_i^2 & \sum q_i r_i \\ \sum r_i & \sum q_i r_i & \sum r_i^2 \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} \sum p_i \\ \sum p_i q_i \\ \sum p_i r_i \end{pmatrix} \dots (23)$$

로 두면 p, q, r 은 아는 항이기 때문에 위의 양변에 Q^{-1} 를 곱하므로써 해를 구할수 있다. 즉,

$$\begin{pmatrix} \frac{k}{l} \\ -\frac{m}{l} \\ -\frac{n}{l} \end{pmatrix} = Q^{-1}C \dots (24)$$

또한

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \dots (25)$$

가 되므로 식 (24) 와 식 (25) 로 부터 k 와 l, m, n 을 구할 수 있다.

여기서 구한 l, m, n 은 습곡축의 방향여현이다. 그리고 $k=0$ 이면 그 습곡은 원통형이고 $k>0$ 면 원추형이다.

3-5. 컴퓨터 프로그래밍

컴퓨터의 입력 자료는 습곡층면의 경사와 경사 방향이므로 먼저 수집된 자료인 습곡층면의 주향과 경사를 경사 방향과 경사로 바꾸었다. 경사 방향이란 북을 기준으로한 방위각으로 주향이 E이고 경사 방향이 S인 경우 경사 방향은 (주향)+90°이고, 역시 주향이 E이고 경사 방향이 N인 경우는 (주향)+270°이고, 주향이 W이고 경사 방향이 S인 경우는 (270°)-주향이고, 역시 주향이 W이고 경사 방향이 N인 경우는 90°-(주향)이다. 경사는 과습곡(over turned fold)되지 않는 경우는 보통 경사와 마찬가지로 취급하지만 과습곡된 경우 limb의 경사는 180°-(경사)로 취급한다.

각 sub-area 에서 수집한 자료에 대한 분산 행렬 A 와 이의 고유치와 고유벡터를 전자계산기를 이용하여 구하였다. 분산행렬 A 와 고유치, 고유벡터를 구하는 전자계산 flow chart 는 Tab. 1 과 같다.

그리고 원통형 및 원추형 습곡의 축과 cylindrisity 를 결정하기 위한 행렬 Q 와 이의 inverse 행렬 Q⁻¹ 를 구하기 위한 전자계산 flow chart 도 Tab. 1 에 수록했다.

4. 결과 및 해석

4-1. 선형 대수법에 의한 정량적 구조

선형 대수법에 의해 얻은 각 sub-area 에 대한 3 차원적 습곡구조는 각 sub-area 에 대한 axial trace, σ_1 의 directional trace, plunge, axial trace 와 σ_1 의 directional trace 가 이루는 교각으로 Tab. 2 에 표시하였다. 또한

table. 2 의 자료를 이용하여 각 sub-area 의 axial trace 와 plunge 를 Fig. 4 에 도시하였다.

sub-area G71-G88 에 대한 cylindrisity 는 식 (24) 와 식 (25) 를 이용하여 구했으며 그 결과는 Tab. 3 에 수록하였다.

Tab. 2

Sub-area No.	Axial trace	Directional trace of σ_1	Plunge angle	Angle bet. dire. trace of σ_1 and axial trace
N-1	N 37° E ↗	N 65° W	15	78
N-2	N 37° E ↗	N 25° W	18	62
N-3	N 46° E ↗	N 26° W	20	72
N-6	N 64° E ↗	N 25° W	+ 3	89
N-7	N 38° E ↗	N 48° W	+15	86
N-8	N 32° E ↗	N 64° W	+20	96
N-9	N 47° E ↗	N 42° W	+ 8	89
N-10	N 70° E ↗	N 20° W	- 6	90
N-12	N 65° E ↗	N 30° W	+ 9	95
N-13	N 30° E ↗	N 87° E	-14	57
N-14	N 31° E ↗	N 89° E	-17	58
N-15	N 40° E ↗	N 31° W	+24	71
N-16	N 24° E ↗	N 66° W	-16	90
N-17	N 70° E ↗	N 4° W	-17	74
N-18	N 4° W ↘	N 78° E	-23	82
N-19	N 46° E ↗	N 48° W	+19	94
N-20	N 61° E ↗	N 35° W	+19	96
N-21	N 30° E ↗	N 60° W	+ 3	90
N-22	N 77° W ↙	N 19° E	-13	96
N-23	N 47° W ↘	N 49° E	+34	96
N-24	N 10° E ↗	N 81° W	+19	91
N-25	N 30° E ↗	N 62° W	+10	92
N-26	N 18° E ↗	N 72° W	+ 9	90
N-27	N 52° E ↗	N 38° W	+ 6	90
N-28	N 49° E ↗	N 40° W	+ 2	89
N-29	N 38° E ↗	N 52° W	- 9	90
N-30	N 40° E ↗	N 47° W	+12	87
N-31	N 70° E ↗	N 21° W	+ 0	91
N-32	N 78° E ↗	0	- 6	78
N-33	N 24° E ↗	N 61° W	+ 9	85
N-34	N 17° E ↗	N 71° W	-29	88
N-35	N 17° E ↗	N 79° W	-15	96
N-36	N 34° E ↗	N 61° W	- 2	95
N-37	N 18° E ↗	N 57° W	+13	39
N-38	N 6° W ↘	N 86° E	+25	92
N-39	B 7° E ↗	N 85° W	-29	92
N-40	N 8° W ↘	N 83° E	+15	91
N-41	N 10° E ↗	N 88° W	+15	98
N-42	N 12° E ↗	N 77° W	+19	89

N-43	N49° E↙	N 3°W	-12	52	N-100	N24° E↙	N45°W	+11	69
N-44	N38° E↙	N 7°W	- 6	45	N-102	N17° E↗	N73°W	- 1	90
N-45	N18° E↙	N79°W	+13	97	N-103	N25° E↙	N40°W	-11	65
N-46	N22° E↙	N47°W	+22	69	N-104	N15° E↗	N78° E	-15	63
N-47	N45° E↙	N39°W	- 2	84	N-105	N46° E↙	N30° E	+17	16
N-48	N33° E↙	N53°W	+ 8	86	N-106	N69° E↙	N33° E	- 9	36
N-49	N40° E↙	N15°W	- 4	55	N-107	N21°W↘	N70°W	+31	49
N-52	N 8°W↖	N80° E	+26	88	N-108	N22°W↘	N71°W	+33	49
N-53	N 4°W↙	N86° E	+17	90	N-109	NS↓	N90°W	0	
N-54	N13° E↗	N82°W	-22	95	N-110	N27° E↘	N86°W	+ 3	113
N-55	N 2° E↙	N86°W	+13	88	N-111	N36° E↙	N42°W	- 2	78
N-56	N 6° E↙	N85°W	+16	91	N-115	N35° E↙	N54°W	+10	89
N-57	N 7°W↗	N80° E	-19	87	N-116	N32° E↙	N89°W	-48	121
N-58	N 4° E↘	N87°W	-20	93	N-119	N67° E↙	N29° E	-38	38
N-59	N 5° E↙	N84°W	+15	89	N-120	N49° E↙	N27°W	- 3	76
N-60	N 7° E↙	N49° E	-24	42	N-121	N42° E↙	N 4° E	-14	38
N-61	N 9° E↗	N32° E	-22	23	N-122	N 2°W↘	N85° E	-35	87
N-62	N30° E↙	N80°W	+16	110	N-127	N36° E↙	N56°W	+15	92
N-63	N 3° E↗	N88°W	- 5	91	N-128	NS↓	N81° E	-40	81
N-64	N21° E↗	N89°W	-13	110	N-130	N39°W↖	N57° E	+18	96
N-65	N17° E↗	N30° E	-26	13	N-131	N79° E↙	N 3°W	-19	82
N-66	N20° E↗	N53° E	-16	33	N-132	N85°W↘	N 7° E	- 5	92
N-67	N16° E↗	N76°W	- 0	92	N-133	N63° E↙	N54° E	-16	9
N-68	N16° E↗	N59° E	- 7	43	N-136	N53°W↖	N53°W	-36	106
N-69	N 9° E↗	N85°W	-10	94	N-137	N 5° E↗	N48°W	+64	53
N-70	N 8° E↙	N85°W	+ 9	93	N-141	N59° E↗	N88° E	-31	29
N-71	N28° E↙	N60°W	+13	88	N-142	N60° E↗	N66° E	-34	6
N-72	N37° E↙	N53°W	+ 2	90	N-143	N24° E↙	N79°W	+24	103
N-73	N66° E↙	N23°W	- 3	89	N-144	N47° E↗	N50°W	- 4	97
N-75	N10° E↗	N84°W	-23	94	N-145	EW→	N 0°W	0	90
N-76	N23°W↘	N68° E	-12	91	N-146	N17°W↖	N81° E	+29	98
N-77	N18°W↘	N70° E	-22	88	N-147	N60° E↘	N 2° E	+43	58
N-78	N15° E↗	N77° E	- 9	62	N-148	N29° E↙	N59°W	- 1	88
N-79	N14° E↗	N80° E	- 6	66	G-71	N68° E↙	N20°W	- 4	88
N-82	N22° E↙	N67°W	+ 3	89	G-72	N52°W↘	N49° E	-22	79
N-83	N24° E↗	N67°W	- 6	91	G-73	N73° E↙	N17°W	0	90
N-84	N40° E↙	N49°W	+ 8	89	G-74	N44°W↘	N53° E	-20	83
N-85	N33° E↗	N56°W	+ 5	89	G-75	N83° E↗	N 7° E	+24	76
N-86	N69° E↙	N20°W	- 9	89	G-76	N25°W↖	N72° E	+33	83
N-87	N67°W↖	N15° E	+38	82	G-77	N 7° E↗	N88° E	-24	81
N-88	N43°W↘	W75° E	- 8	62	G-78	N66°W↖	N34° E	+22	80
N-89	N78°W↗	N27°W	+22	51	G-79	N78° E↙	N10°W	-24	88
N-90	N27° E↗	N65°W	- 7	88	G-80	N41°W↘	N54° E	-31	85
N-91	N26° E↙	N56°W	+10	82	G-81	N36° E↙	N50°W	- 4	86
N-93	N36° E↙	N23° E	-29	13	G-82	N22° E↙	N80°W	+25	78
N-96	N24° E↙	N 3°W	+10	27	G-83	N66° E↙	N36°W	+14	78
N-97	N23° E↗	N71°W	-13	94	G-84	N69° E↙	N27°W	+12	84
N-98	N 1°W↖	N79°W	- 5	78	G-85	N79° E↙	N11°W	-13	90
N-99	N14° E↗	N66° E	+13	52	G-86	N33° E↙	N48°W	+19	81

G-87	N 8° E ↘	N 82° W	-18	90
G-88	N 16° E ↘	N 80° W	-3	84

※ Plunge의 +부호는 axial trace vector가 수평면보다 위쪽을 향함을 의미한다.

Tab. 3

Sub-area No.	Cylindrisity (k)	Sub-area No.	Cylindrisity (k)
G-71	0.6036521	G-80	0.0419722
G-72	0.198983	G-81	-0.5398595
G-73	0.5387155	G-82	-0.1800574
G-74	0.0378034	G-83	-0.2780987
G-75	-0.7961181	G-84	0.1416892
G-76	-0.7752435	G-85	0.5329148
G-77	-0.0605504	G-86	-0.4004526
G-78	-0.0433045	G-87	0.3025194
G-79	0.5209601	G-88	0.00844436

G71-G88의 평균 cylindrisity는 0.00844이다. 따라서 $\cos^{-1} 0.00844 \approx 90^\circ$ 이므로 함백향사는 cylindrical type 습곡이며 습곡축에 비스듬한 면으로 잘린 모양의 습곡이다.

4-2. 구조 지질학적 해석

습곡구조의 구조역학적 연구시 습곡축에 대한 정량적인 기하학적 해석은 매우 중요하다. KIGAM (1979)에 의하면 본 향사의 축은 고한-사북간에서는 N70°-80°W이며 서쪽으로 가면서 N70°-80°E의 방향으로 변한다고 하였다. 그러나 본 연구 결과에 의하면 화절치 단층을 경계로 하여 서부 지역의 습곡축은 N68°E, N73°E, N78°E, N79°E, N83°E의 방향이며 동부지역에서는 N25°W, N41°W, N44°W, N52°W, N66°W의 방향을 나타낸다. 즉 서부지역에서는 KIGAM에 의해 조사된 의견 습곡축과 비슷하나 동부지역에서는 차이가 난다. 다시말해서 동부지역에서는 동쪽으로 갈수록 의견상으로 나타나는 습곡축 보다 훨씬 좀더 동으로만곡하고 있다.

이러한 차이점은 이지역의 구조를 역학적으로 해석하는데 중요한 의미를 갖는다. 왜냐하면 습곡축의 방향은 그 습곡을 일으키게 한 횡압력의 방향을 고유하게 결정해 주기 때문이다.

대부분의 경우 의견습곡축과 실제습곡축과는 거의 일치하지만, 습곡된 층의 노두가 습곡축과 평행하게 나타나지 않는 경우 습곡축의 방향은 잘못 인식되기 쉬우며 이의 정확한 결정을 위해서는 본 연구에서 행한 대로 많은 자료를 수집처리하는 선형대수법이 매우 유용하다고 사료된다.

전술한 바와 같이 본 역의 E-W와 NE-SW 두 구조의 생성 순서에 대해서 의견이 엇갈리고 있다. 손치무 (1969), 김옥준 (1970, 1973), 강필중등 (1977)은 E-W가 먼저이고, NE-SW가 후기라고 하였고, 정창희 (1969), KIGAM (1979)는 그 반대로 해석하였다.

본 연구에서 함백향사 구조를 정량적으로 해석한 결과 이들간의 상호관계는 E-W가 NE-SW보다 먼저인 것으로 밝혀졌다.

그 이유는 본역의 E-W 습곡은 multiple layer의 folding 현상이다. 이러한 multiple layer는 동일한 횡압력에 의한 각 layer의 변형이 각 layer의 물리적 특성 특히 이웃한 layer의 상대적인 물리적 특성(예를들면, competency, brittleness, viscosity, etc.)에 따라 달라진다. 즉 multiple layer인 경우 각 layer의 습곡축의 방향이나 hinge의 위치가 달라질수 있으며 층의 두께가 변할수 있다. 본 함백향사의 각 layer의 습곡축을 구해본 결과 전체적인 방향은 비슷하지만 그 개개는 약간씩 다르다. 화절치 단층 동부의 경우 대석회암층은 N52°W이고, 만항층은 N44°W, 장성층은 N66°W, 함백산층은 N41°W 등 대략 N40°-66°W의 trend를 보인다.

그리고 이들의 상부층인 도사곡층, 고한층, 동고층은 습곡축이 각각 N22°E, N66°E, N69°E, 로써 그 하부 층과는 전혀 다른 NE trend의 습곡축을 나타낸다. 이것은 습곡작용을 받을 시 채 굳어지지 않은 비교적 신기의 지층인 도사곡층, 고한층, 동고층 등이 낮은 분지로 재퇴적된 후 NE trend의 습곡작용에 의해 이들 지층이 교란되어 NE 방향으로 많은 부분이 재배열된 것으로 해석되어 진다. 따라서 E-W 습곡이 NE-SW 습곡보다 먼저라고 사료된다.

4-3. 3차원적 구조해석의 의의

지질도 작성에서 mapping이란 3차원의 지질구조를 2차원의 평면위에 일종의 사영 변환의 원리에 따라서 도시하는 작업이다. 그러나 사영 변환과정중 경우에 따라서는 길이나 각의 크기가 달라질수 있으며 이렇게 달라지는 요소를 이용하여 3차원적 해석을 할 경우에는 오류를 범할 수 있다. 이러한 오류는 습곡구조 map을 이용한 구조역학적 해석 과정에서 일어날 수 있다. 왜냐하면 지질도상의 습곡축인 axial trace로 그 습곡 변형의 mechanism을 유추할 경우 axial trace와 maximum principal compressive stress (σ_1)의 direction과는 일대일 대응이 되지 않기 때문이다. 예를 들면 습곡축이 plunge되어 있거나 습곡축면이 dipping되어 있는 경우 σ_1 의 direction이 정해지면 지질도상의 습곡축(axial trace)은 고유하게 정해지지만 지질도상의 습곡

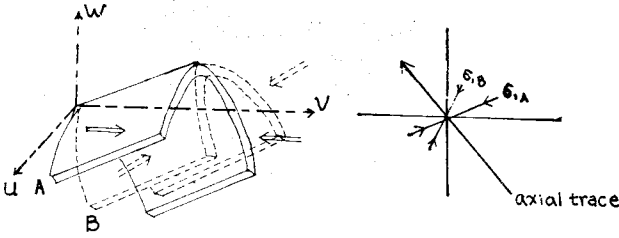


Fig. 11 Relationship between dipping of axial plane and direction of the maximum principal compressive stress.

축의 변형을 일으킬수 있는 σ_1 의 방향은 무수히 많을 수 있다(Fig. 11).

Fig. 11에서 fold axis는 같고 습곡축면의 dipping이 다른 습곡 A와 습곡 B에서 fold axis 및 axial trace는 같지만 σ_1 의 방향은 서로 다르다.

결론적으로, 습곡변형으로 부터 σ_1 의 direction을 유추할 경우 axial trace가 아닌 3차원적인 습곡축을 고려해야만 unique한 결과를 얻을 수 있다. 때문에 습곡축의 plunge나 습곡축면의 dipping을 알아내는 것은 매우 중요하다.

앞의식(5)로 표시되는 R^T 의 세번째 열인 (b_{13}, b_{23}, b_{33}) 는 습곡축을 나타내며 두번째 열 (b_{12}, b_{22}, b_{32}) 는 습곡축과 공간상에서 직교하는 σ_1 -axis이다. 습곡축의 axial trace는 (b_{13}, b_{23}) 가 되며 σ_1 의 2차원적인 방향은 (b_{12}, b_{22}) 이다. 이 두축은 $b_{33} \neq 0$, 즉 습곡축이 plunge되어 있으며 $b_{32} \neq 0$, 즉 습곡축면이 dipping되어 있는 경우에는 직교하지 않는다(Fig. 12).

Fig. 12에서 선분 ab 와 cd 가 만약 XY 평면과 평행하지 않는다면 ab 와 cd 가 공간상에서 직교하더라도 $a'b'$ 와 $c'd'$ 는 직교하지 않는다.

이때 습곡축의 plunge는 $\tan^{-1} \frac{b_{33}}{\sqrt{b_{13}^2 + b_{23}^2}}$ 로 주어지

며 습곡축면의 dipping은 $90^\circ - \tan^{-1} \frac{b_{32}}{\sqrt{b_{12}^2 + b_{22}^2}}$ 로

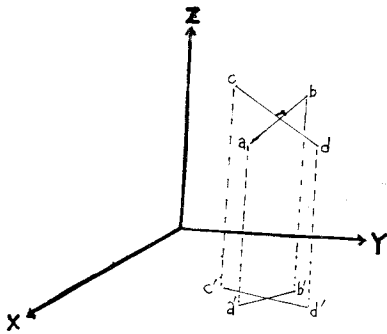


Fig. 12 Projection of the two perpendicularly crossed axes.

주어진다.

다음으로, fold의 양상이 Fig. 13와 같을 경우 이것이 cylindrical fold가 절단된 것인지 conical fold인지를 구별하는 것 또한 중요하다. 왜냐하면 상기 두 경우 axial trace는 같지만 true fold axis의 plunge는 달라질수 있으며 그에 따라 구조역학적인 해석이 달라지기 때문이다. 이러한 cylindricity는 특히 fold가 대규모적이고 노두의 발달이 불연속적일 경우, 식(24)와 식(25)를 이용하여 결정할 수 있다.

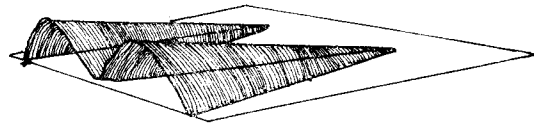


Fig. 13 plunging fold

끝으로, fold의 양상이 Fig. 14와 같을 경우 hinge line과 crest 및 trough가 일치하지 않는다. 이러한 경우에 3차원적인 구조를 파악하지 못하면 crest를 연결한 선을 습곡축으로 오인하기 쉽다.

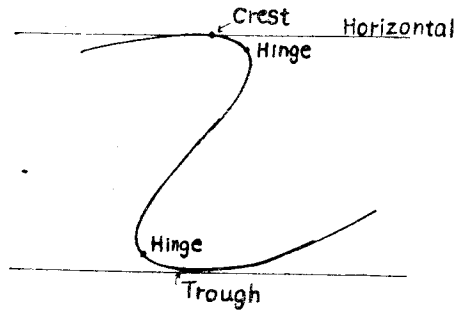


Fig. 14 The case which shows hinge not coincide with crest

결론적으로, 공간적인 습곡축과 σ_1 의 3차원적인 방향은 일대일로 대응되지만 2차원적인 습곡축 즉, axial trace와 2차원적인 σ_1 의 방향은 일대일 대응이 되지 않으며, 이때의 σ_1 의 방향은,

1) 습곡축의 plunge, 2) axial surface의 dip, 3) cylindricity에 따라 다르게 나타나는 복합 함수이다. 때문에 습곡구조의 3차원적인 연구는 매우 중요하다.

4-4. 구조역학적 고찰

함백향사...함백향사에 대한 컴퓨터 해석결과를 이용하여 NS 방향의 구조단면을 작성 도시하면 Fig. 15와 같다.

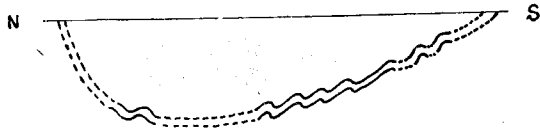


Fig. 15 N-S trending structural section of Hambaek Syncline drawing up through computer analysis

Fig. 15에서 보는 바와같이 함백향사는 북쪽 limb의 경사가 급하고 남쪽 limb은 완만하게 나타나며 습곡측면은 북경하고 있다. 이 습곡의 평균 axial trace는 N 45.6°W이며 이 습곡 변형을 일으킨 이 지역 local σ_1 의 directional trace는 N52.4°E이다. 그리고, 함백향사의 양쪽 limb에 함백향사와 평행한 방향 즉 E-W의 소습곡이 나타난다.

이러한 구조에 대한 정확한 구조해석을 위해서는 함백향사와 동일한 역학적 체계에 의해서 생성된 것으로 사료되는 인접한 무룡리 배사, 옥백 산배사 등에 대해서도 정량적인 구조연구가 있어야 할 것 같다.

NE-SW 방향의 습곡축을 가진 소습곡군 : 이들 습곡군에 대한 컴퓨터해석결과를 이용하여 두위단층 서부의 E-W 구조단면을 작성 도시하면 Fig. 16와 같다.



Fig. 16 structural section of western part of Duwee fault area drawing up through computer analysis.

Fig. 16에서 보는 바와 같이 이들 소습곡군들의 습곡면은 서경하고 있으며, 때로는 과습곡된 구조를 보인다. 이들 변형은 compressional & simple shear movement에 의한 것으로 사료된다.

1st-stage (compressional stage): NW-SE 방향의 compressive stress에 의해 NE-SW (Sinian direction) 방향의 축을 가진 소습곡군들이 함백향사의 양쪽 limb에 형성되었다(Fig. 17).

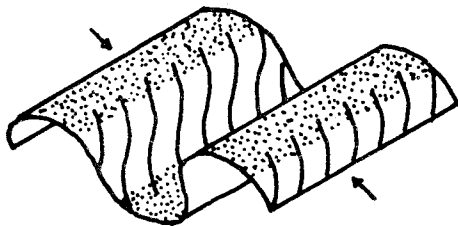


Fig. 17 minor fold can be formed by compressive stress.

2nd-stage (fracture & simple shear stage): NE-SW 방향의 주향과 북서경하는 역단층이 생성되고 단층의 이동에 따른 shear stress가 fold면에 작용하여 습곡면이 서경 또는 overturn된 변형이 생겼다(Fig. 18).

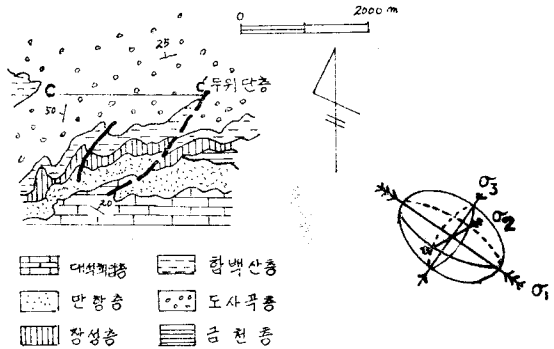


Fig. 18 Geologic map of Duwee fault area and stress ellipsoid.

5. 결 론

습곡측면의 수직단위벡터의 방향 여현을 행렬요소로 하는 분산행렬의 고유치와 고유벡터를 구함으로써 함백향사 습곡구조를 3차원적으로 해석하고 이를 구조역학적으로 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 함백향사를 비롯한 WNE-ESE 방향의 습곡이 primary fold (F_1)이고 NE 내지 NNE 방향의 소습곡군이 secondary fold이다.

(2) 함백향사는 cylindrical type fold이다.

(3) 함백향사의 외견 axial trace는 실제 axial trace와 다르게 나타난다. 즉 함백향사의 외견 axial trace는 고한-사북간에는 N70°-80°W이며 서쪽으로 가면서 N70°-80°E의 방향으로 변하지만 실제 axial trace는 고한-사북간에는 N40°-70°W이고 그 서부지역에서는 N60°-80°E이다.

(4) NE 방향내지 NNE 방향의 소습곡군의 측면이 서경하는 것은 overthrust에 의한 simple shear movement에 의한 것으로 사료된다.

(5) axial trace와 maximum principal compressive stress (σ_1)의 directional trace는 직교하지 않을수 있으며 이들간의 상호각은, 첫째, 습곡축의 plunge 둘째, axial surface의 dip 셋째, cylindricity 등에 따라 변하는 복합함수이다.

(6) 함백향사(F_1)의 mean axial trace는 N45.6°W이며 σ_1 의 mean directional trace는 이와 98°를 이루는 N52.4°E이다.

(7) NE 내지 NNE 방향의 소습곡군(F_2)의 mean axial trace 는 $N21^\circ E$ 이며 σ_1 의 mean directional trace 는 이와 43° 를 이루는 $N22^\circ W$ 이다.

(8) 지각변형의 구조역학적인 과정을 유추하기 위해서는 정량적이며 3 차원적인 구조 해석이 필수적이다.

이와 같은 구조해석방법을 함백향사를 포함한 강원분지 일대에 대하여 확대 실시함으로써 함백향사에 대한 구조역학적인 regional setting 은 물론 한반도에서의 습곡조산운동에 대한 구조역학적 해석이 가능 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 강필중 등, 1977, Landsat-1 영상에 의한 태백산지역 지질구조와 암석분포상태에 관한 연구, 지질학회지, 13권 2호
- 金玉準, 1970, 南韓中部地域의 地質과 地構造, 鑛山地質, 2권 4호
- 남원희, 1968, 삼척탄전 지질 및 시추조사보고, 탄전지질 및 시추조사보고 제 1호
- 서해길등, 1979, 삼척탄전 정밀지질조사 보고서, 자원개발연구소
- 손치무, 정창희, 1965, 태백산지구의 퇴적환경과 지질구조, 서울대학교 논문집 제15집
- 손치무, 1969, 한국의 지각변동에 관하여, 지질학회지 5권 3호
- 손치무, 김형식, 1969, 장성탄전일대의 지질구조, 지질학회지 5권 1호
- 유익규, 구자학, 1964, 삼척 서부탄전지질조사보고, 탄전지질조사보고 제 5호
- 윤석규, 1966, 상동관상 및 그 부근의 지질구조와 중석광상의 광화작용과의 관계, 지질학회지 2권 1호
- 정창희, (1969), 강원도 삼척탄전의 층서 및 고생물(1), 지질학회지 5권 1호
- 태백산지구지하자원조사단보고서, 1962
- Agterberg, F. P., 1961, Tectonics of the crystalline basement of the dolomite in North Italy; *Geologica Ultraiect.*, No. 8, pp. 1~232
- _____, 1964, The method of the statistical structural analysis, *Geologic Mijnb.*, v. 43, pp. 222~35
- Harman, H. H., 1960, *Modern factor analysis*, Univ. of Ohicago press, Ohicago, 469p.
- Kendall, M. G., 1961, *A Course in multivariate analysis*, Charles Griffin & Co. Ltd., London, 185p.
- Loudon, T. V., 1963, The sedimentation and structure in the Macduff district of North Banffshire and Aberdeenshire, Ph. D. Thesis, Univ. Edinburgh, 107p.
- _____, 1964, Computer analysis of orientation data in structural geology, O. N. R. Task No. 389~135, Contr. No 1228 (26), No. B, pp. 1~130.
- Weiss, L. E., 1959 A, Structural analysis of the basement system at Turoks, Kenya; *Overseas Geol. Miner. Resour.*, V. 7, pp. 3~35 & 123~53.
- Whitten, E. H. Timothy, 1966, *Structural geology of folded rocks*, Rand Menally & Company, Chicago.