

斷層帶內의 面 및 線構造의 圖式化를 위한 電算處理

鮮 于 椿*·李 炳 柱*

Computational Treatment for Plotting of the Planar and the Linear Structures in Fault Zone

Choon Sunwoo* and Byung-Joo Lee*

ABSTRACT : Field sampling requires statistical description to draw inferences from data. Field data, or linear structures, are commonly analyzed by the graphical presentations, such as stereonets and rose diagrams. For this purpose the DROPOL program is developed to analyze the data more efficiently with personal computer. DROPOL program written in FORTRAN 77 plots the structural data in points, poles or great circle on equal-area (Schmidt net) or equal-angle (Wulff net) projection surface. It is also capable to project the data from upper or lower hemisphere of stereonet and to draw pole contour diagrams from the plotted data. The rose diagram, representing the frequency of the strike and dip angle, can also be drawn in general or smooth type using 5° or 10° degrees interval.

序 論

斷層이나 節理는 지각에서 흔히 잘 관찰되는 지질구조 요소로서, 이들의 발달상태의 특징은 많은 地質學分野에서 이용된다. 특히 構造地質學分野에서 단층 및 절리에 대한 연구는 Anderson (1942) 이후 많은 발전이 있었다. 그후 走向移動斷層의 生成機構 및 이에 隨伴된 제반 지질구조의 연구가 활발히 이루어졌다 (Moody and Hill, 1956; Wilcox and Seely, 1973; Woodcock and Robertson, 1982). 野外에서 측정된 단층면의 態位(Attitude), 條線(Striation) 및 단층의 이동방향(Movement sense)을 이용하여 Stress tensor을 구함으로써 主應力軸(Principal stress axis)의 방향을 구하고, 古應力場(paleostress field)을 復元하는 연구(Angelier, 1979, 1983, 1984; Etchecopar et al., 1981; Michael, 1984)가 활발히 이루어지고 있으며, 또한 구조적 운동이 일어난 당시의 응력의 크기를 구하는 시도가 이루어지고 있다 (Angelier, 1989). 이러한 연구가 가능한 것은 많은 量의 資料를 처리

할 수 있는 Computer의 발달 때문이다.

야외에서 측정된 面構造나 線構造와 같은 지질구조의 자료들은 이 不連續面들이 형성될 때 어떤 應力 條件下에서 형성되었기 때문에 일정한 방향으로 分布되어지는 方向性의 결과를 推論하기 위해 자료의 圖式化가 요구되어 진다. 따라서 본 논문은 Personal computer를 이용하여 야외에서 측정된 면구조 및 선구조등과 같은 지질자료들을 圖式化할 수 있는 DROPOL program의 Algorithm과 자료의 入力에 대해 敘述하고자 한다.

이 DROPOL program은 FORTRAN 77로 작성되었으며, 面構造의 Pole 및 이들 Pole의 頻度を 표시하는 Contour diagram의 作圖, 2가지 형태의 Rose diagram(주향 및 경사의 빈도작도)과 면구조의 대원(Great circle), 그리고 대원상의 Striation을 표시하는 Subroutine 들로 구성되었고, Plotting을 위해서 CALCOM84. LIB을 이용하였다.

Diagram의 作圖원리

본 Program에 적용된 投影技法은 흔히 구조지질학 분야에서 사용되는 球體에서의 下半球(Lower hemisphere) 投影

* 韓國動力資源研究所 (KIER, Daedeok P. O. Box 5, Daejeon, Korea)

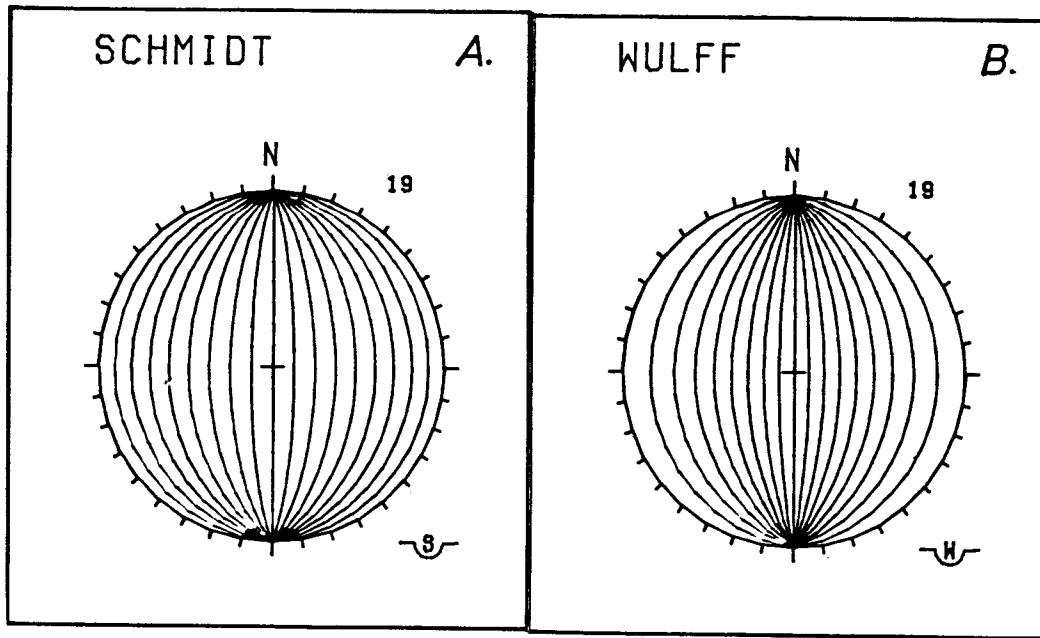


Fig. 1. Projection of Schmidt (A) and Wulff nets (B) (Inclined plane of 10 by 10° degrees).

이나 結晶學 분야 등 他 分野에서도 사용 가능한 上半球 (Upper hemisphere) 投影이나, 또한 사용되는 Net의 種類도 Wulff net (Equal angle projection) 와 Schmidt net (Equal area projection) 중 擇一할 수 있도록 하여 上記 4개의 투영 방법을 선택 사용할 수 있다 (Fig. 1).

Pole 및 Lineation의 作圖

傾斜方向의 方位角이 θ 이고 傾斜角이 α 인 면구조나 線

구조의 경우 北을 y-좌표축으로, 東쪽을 x-좌표축으로 하고, 下半球 투영시 Pole 및 Lineation의 (x, y) 좌표값은 Table 1과 같다(Fig. 2). 그리고 上半球 投影에서의 Pole 및 Lineation의 (x', y') 座標 값은 Table 1의 (x, y)좌표를 원점에 대한 대칭 이동의 값으로 1)식과 같다.

$$x' = -x, y' = -y \quad 1)$$

Table 1. 下半球 投影에서의 座標

	Wulff net上	Schmidt net上
Lineation	$OS = OP \tan A$ $r = R \tan A$ $x = r \sin \theta$ $y = r \cos \theta$	$OS = \sqrt{2}OP \sin A$ $r = \sqrt{2}R \sin A$ $x = r \sin \theta$ $y = r \cos \theta$
Pole	$r' = R \tan (\alpha/2)$ $x = r' \sin 180 + \theta$ $y = r' \cos 180 + \theta$	$r' = 2R \sin (\alpha/2)$ $x = r' \sin 180 + \theta$ $y = r' \cos 180 + \theta$

R; 球의 半徑, θ ; 傾斜方向의 方位角, α ; 傾斜, $A = (\pi/4 - \alpha/2)$.

大圓 (Great circle)의 作圖

Net상의 Great circle의 作圖原理에 대해서는 많은 學者들에 의해 시도되었다(Duncan, 1981; Bell, 1987; Pilant, 1989). 그러나 여기에서는 주어진 斷層面에서 NO° 에서 $N180^\circ$ 까지 角度的 變化(角 β)에 따른 Lineation을 작도하는 원리를 이용하여 Great circle을 작도한다. 즉 Fig. 3에서와 같이 주어진 하나의 단층면(경사방향의 방위각 θ 와 경사각 α)에서 β 의 값을 NO° 에서 $N180^\circ$ 까지 변화를 주어 그때의 방위각 ω 와 경사 γ 의 값을 갖는 線構造에 대해 요구되는 Net의 종류에 따라 Table 1과 같이 座標를 구한다. 方位角 ω 과 傾斜 γ 의 값을 구하는 식은 2)와 3) 식과 같다(Fig. 3참조).

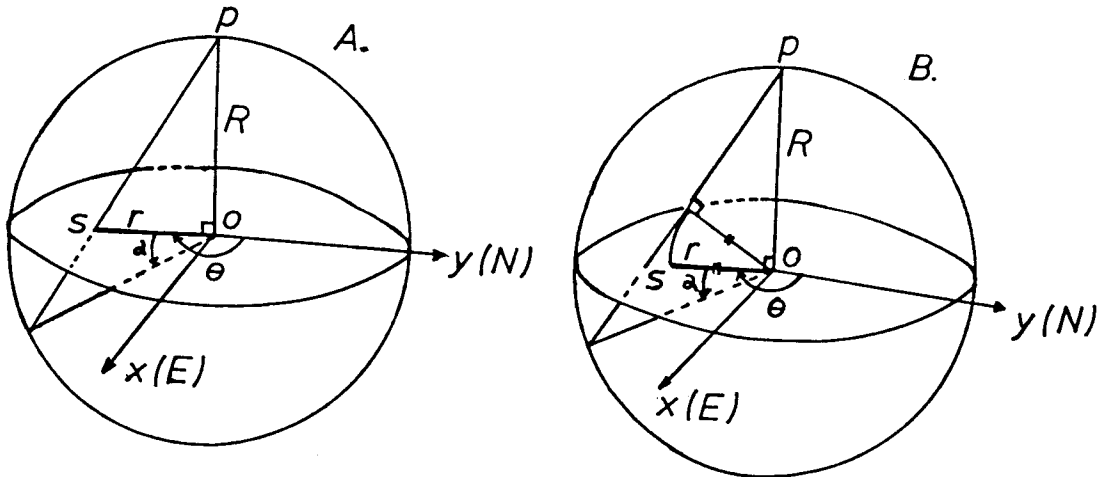


Fig. 2. Construction of Wulff (A) and Schmidt (B) projection adopted to lower hemisphere. S is the point that presents the direction of plan OSP on the circle of horizontal projection. θ ; dip direction, α ; dip, N ; north, E ; east.

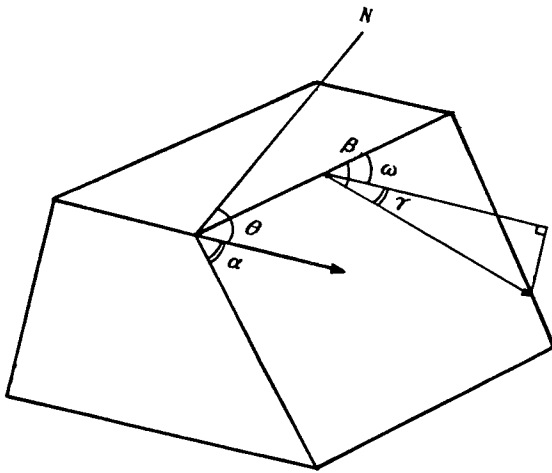


Fig. 3. Geometry for plotting great circle on a given fracture plane (dip direction θ and dip). Explication of symbol is in the text.

$$\omega = \tan^{-1} (\tan \beta \cos \alpha) \quad 2)$$

$$\gamma = \sin^{-1} (\sin \alpha \sin \beta) \quad 3)$$

그러나 이 좌표(X, Y) 들은 면구조의 走向方向을 기준으로한 값이므로 4)식을 이용하여 진북에 대한 좌표계 (x, y) 로 변환시켜 이 점들을 連結함으로써 대원을 작도한다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta - 90^\circ) & \sin(\theta - 90^\circ) \\ -\sin(\theta - 90^\circ) & \cos(\theta - 90^\circ) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \quad 4)$$

Contour diagram의 作圖 (Fig. 6참조)

Kamb (1959) 이후 구조지질학 분야등에서 極点의 等高線 Diagram이 자료의 統計的인 處理에 널리 이용되고 있다. Schmidt나 Wulff의 Projection을 이용하여 Density 를 함수로 Data의 分布에 대한 等高선이 캔버스 위에 작도된다. 일반적으로 Density를 설정하기 위해 이미 투영된 Data를 캔버스 위에서 직접 Counting을 실시하는 경우가 있으며 (Kohlbert and Scheidegger, 1977), 이는 Counting circle의 形態가 位置에 따라 변하기 때문에 캔버스 中心에서는 圓이 되지만, 캔버스 가장자리에서는 橢圓形이 되기 때문에 Counting에 있어서 Counting circle의 變形을 고려해야 한다.

이러한 방법은 여러 사람에 의해 개선되었으며, Counting의 방법은 單位 參照球 內의 Counting 원뿔에 의해 球 공간내에서 직접 이루어지며, 컴퓨터를 이용한 여러종류의 방법이 발표되었다 (Kalkani and Von Frese, 1979, 1980, 1982; Robin and Jowett, 1986). Counting 원뿔은 規則的인 형태로 方向과 傾斜를 각각 2°와 2°, 5°와 5° 혹은 10°와 10°씩을 증가시키며, 이와같이 결정된 Grid의 Nodal point 數는 增分の 크기에 따라 변하며 자료의 Density에 대한 正確度는 增分の 값이 적을수록 커진다. 결국 Density는

Counting 원뿔내에 속하는 Data 수를 이 원뿔의 中央인 軸에 그 값이 配分된다. Huang(1987)과 Huang, et al. (1987)은 이 Contour의 작도원리 및 Filtering 함수에 대해 잘 설명하고 있고 본 Program의 Contour diagram 작도는 그 원리를 따르고 있으므로 상세한 것은 생략한다.

Rose diagram 의 작도

Rose diagram은 Pole diagram 처럼 같은 방향의 走向을 갖는 Fracture 群에서는 傾斜方向과 傾斜를 구분할 수 없는 短點이 있으나, Fracture의 方向分布를 연구하기 위해 많이 사용되고 있다. 본 Program에서는 走向方向, 傾斜方向 및 傾斜의 분포를 5° (Fig. 4. A) 나 10° (Fig. 4. B-E) 의 間隔으로 각 방향에 따른 Fracture의 빈도를 나타낼 수 있고,

아래의 a) 와 b) 같이 2가지 형태의 Diagram을 작도할 수 있으며, 또 각 형태별로 2가지 모양의 Diagram을 작도할 수 있어 총 8가지 형의 Rose diagram을 작도할 수 있다 (Fig. 4).

a) 一般的인 型 : 각 방향의 Class에 속하는 Rose diagram의 半徑 길이는 그 Class에 속하는 Data 數 F_i 에 比例 (Fig. 4, A, B, D).

b) Smooth 型 : 각 방향의 Class에 속하는 Rose diagram의 半徑 길이는 그 Class에 속하는 5) 식의 F_i 에 比例 (Fig. 4. C, E).

$$F_i = \frac{F_i + 0.5(F_{i-1} + F_{i+1})}{2} \quad 5)$$

F_i : i번째 Class 에 속하는 Data 數를 나타냄.

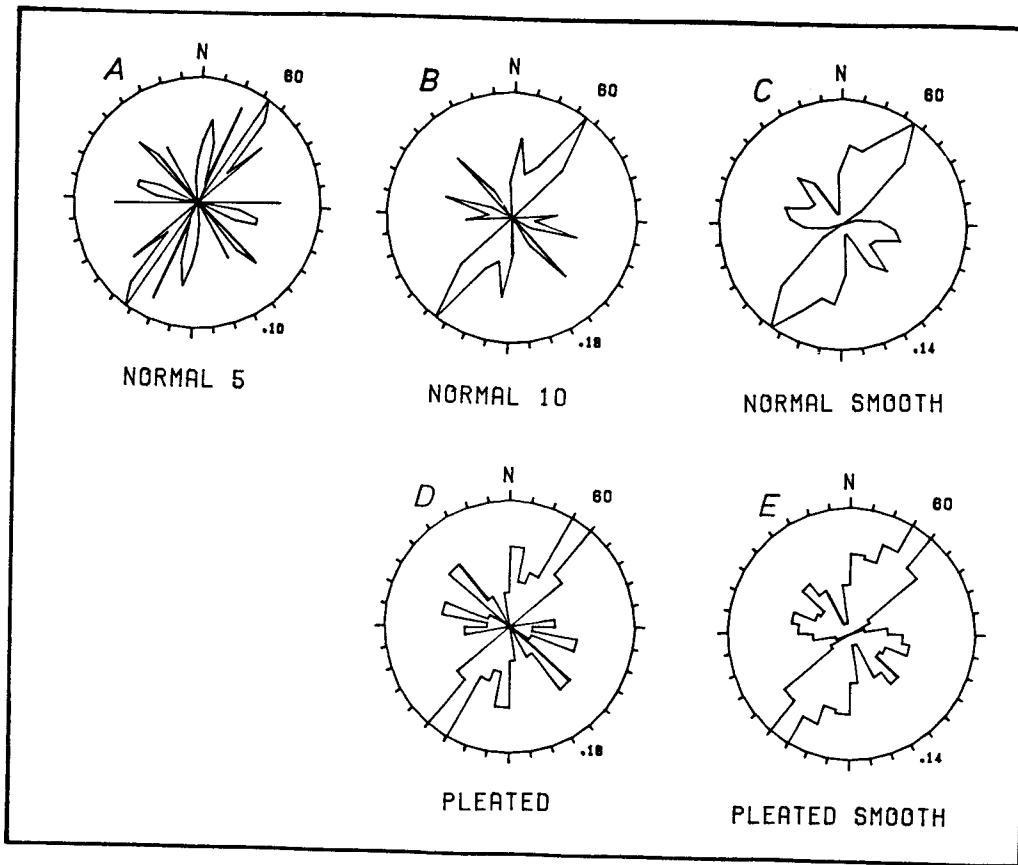
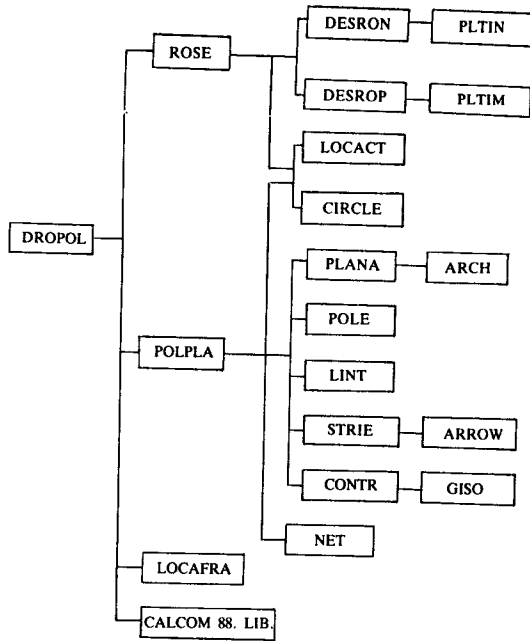


Fig. 4. Various type of rose diagram ; normal type(A, B, D)and smooth type(C, E). A is classified in 5° by 5° and the others in 10° by 10°.

DROPOL의 Block diagram



Subroutine 說明

- 1) ROSE : Rose diagram을 작도하기 위한 Subroutine으로 5°와 10°의 간격으로 분류할 수 있고, 4가지 형태의 Rose diagram을 작도할 수 있다 (Fig. 4참조).
- 2) POLPLA : 여러요소들, 즉, Pole, Great circle, Striation, Lineation 및 Contour 중에서 작도할 요소를選擇하는 Subroutine 이며, PLANA는 Great circle 을 작도하고, POLE은 Pole의 Diagram을, LINT는 Lineation들을 작도하며, STRIE는 Great circle 상에 Striation 을 나타내는 Striae의 방향을 표시하며, 또한 단층의 형태를 표시한다. 또한 CONTR는 Pole들의 분포에 따른 Pole diagram 을 작성하며, LOCACT와 CIRCLE은 작도될 각 원의 위치 계산과 원을 작도하고, NET는 Net 형태를 나타내는 기호를 표시하는 Subroutine 들이다.

Data의 入力

여기서 DROPOL program에 필요한 자료의 入力順序는 다음과 같으며 (Table 2), Table 2에 나타나는 Data의 값은 현장 測定值가 아닌 任意의 값들이다.

- 1) ZTIT : 調査地域名 (25자 이내)
- 2) STRT : 자료가 속하는 地質時代(25자 이내)
- 3) TP1, TP2, TP3, ALPA, PEND, ST, REF (FORMAT: 3A1, 2X, 3F5.0, 5X, A25)

a) TP1에는 地質構造의 要素를 나타내는 것을 입력하며, F는 단층 (Fault), D는 주향이동단층 (Strike slip fault), J는 절리 (Joint), L은 선구조 (Lineation) 그리고 B는 층리 (Stratification)를 나타낸다.

b) TP2에는 斷層들의 運動形態를 입력하는 것으로, N은 正斷層 (Normal), I는 逆斷層 (Inverse)을, D는 右手向 (Dextral) 그리고 S는 左手向 (Sinistral)의 走向移動方向을 나타낸다.

c) TP3에는 斷層運動方向의 確認程度를 입력하며, P는 Probable, S는 Supposed, 그리고 C는 Certain을 나타낸다.

d) ALPA에는 不連續面의 傾斜方向, PEND는 이 不連續面의 傾斜 그리고 ST는 조선 (Striation)의 값을 입력하며, 確認되지 않은 PEND와 ST에는 0을 대입한다.

e) REF에는 25字 以內의 其他 필요한 參照事項을 입력한다.

Data의 出力

Rose diagram

a) Rose diagram (Fig. 5 참조)은 不連續面들의 走向方向, 傾斜方向, 그리고 傾斜分布를 나타내는 3개의 Diagram으로 표시된다.

b) 각 원의 右側上端의 수는 Data의 數(30)를 나타낸다.

c) 각 원의 右側 下端에 표시된 數는 最大分布를 나타내는 Class 에 속하는 Data 數가 전체 Data 數에 대한 比를 표시한다(예를 들어, 주향방향 N30° -N40° 에 속하는 data는 전체 data 數 30개에 대해 0.16이므로 5개에 해당한다).

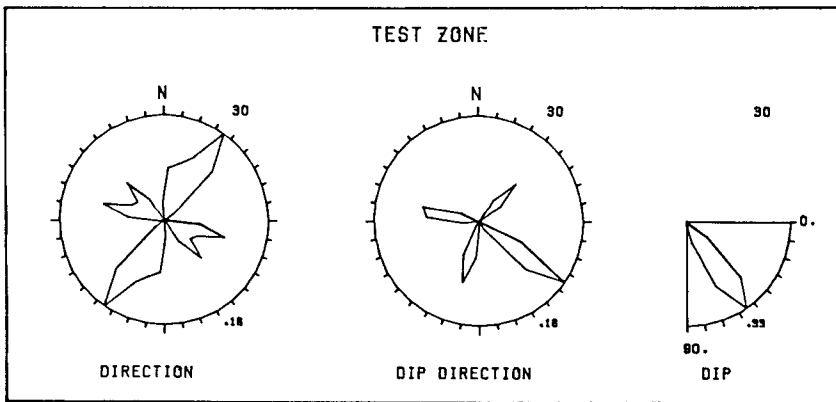


Fig. 5. Rose diagram for data of Table 2 (explication of symbol is in the text).

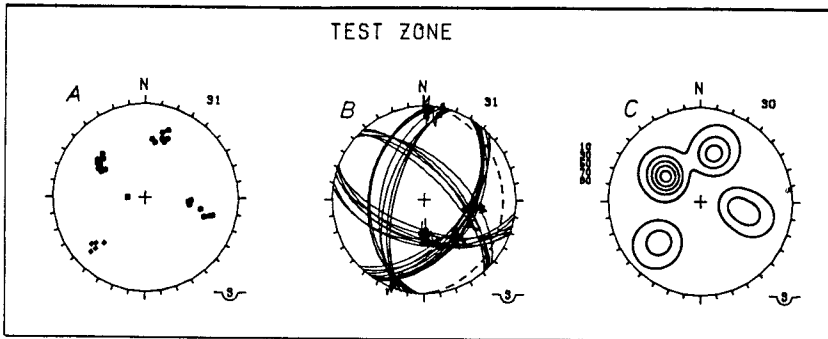


Fig. 6-1. Equal-area projection(Schmidt net) for data of Table 2. A ; pole, B ; great circle, C ; pole contour diagram (Explication of symbol is in the text).

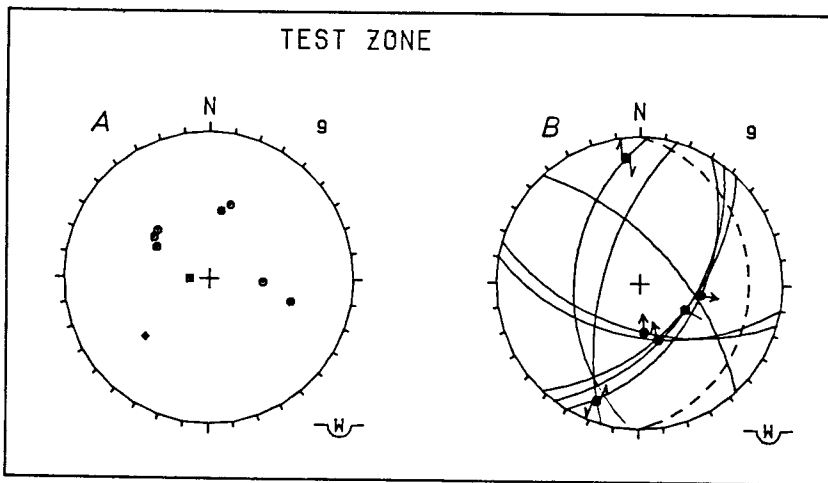


Fig. 6-2. An Example of equal-angle projection (Wulff net). A ; pole, B ; great circle.

Table 2. Input data for plotting.

TEST ZONE (ZTIT)				
JURASSIC (STRT)				
TP	ALPA	PEND	ST	REF
FNC	120.	45.	75.	SUN 1
FNC	121.	47.	75.	SUN 1-1
FNC	121.	49.	105.	SUN 1-2
FNC	122.	46.	100.	SUN 1-3
FNP	123.	49.	71.	SUN 2
FNP	124.	43.	85.	SUN 2-1
FNP	125.	53.	95.	SUN 2-2
FNS	126.	50.	70.	SUN 3
FNS	128.	55.	75.	SUN 3-1
FN	132.	51.	0.	SUN 4
FN	135.	55.	0.	SUN 4-1
FIC	190.	50.	75.	SUN 5
FIC	187.	53.	78.	SUN 5-1
FIS	195.	61.	85.	SUN 6
FIS	199.	65.	80.	SUN 6-1
FIP	196.	55.	77.	SUN 7
FIP	199.	53.	79.	SUN 7-1
FI	201.	57.	78.	SUN 8
DDS	273.	41.	3.	SUN 9
DDS	275.	39.	5.	SUN 9-1
DDP	278.	40.	5.	SUN 9-2
DSC	285.	61.	10.	SUN 10
DSS	284.	64.	170.	SUN 10-1
DSP	287.	56.	174.	SUN 10-2
D	281.	51.	15.	SUN 11
J	45.	71.	0.	SUN 12
J	47.	61.	0.	SUN 13
J	49.	65.	0.	SUN 14
J	42.	55.	0.	SUN 15
J	44.	65.	0.	SUN 16
B	90.	15.	0.	SUN 17

Projection diagram

- a) 各 圓의 우측상단의 數는 Data의 總數를 나타낸다.
- b) 斷層의 形態표시는 正斷層의 경우는 화살표의 방향이 원의 중심에서 밖으로 표시되며 (↗), 逆斷層은 원의 중심으로 향하며 (↖), 走向移動斷層의 경우는 양쪽으로 향하며, Dextral은 오른쪽 화살표가 밖으로 (↗), 그리고 Sinistral은 왼쪽 화살표가 밖으로 (↖)향한다.
- c) Net type 은 각원의 우측하단에 표시되며, \cup 은 下半球 投影을, Ω 은 上半球 投影을 나타내며, 이 기호내의 W와 S는 각각 Wulff net와 Schmidt net를 나타낸다.
- d) Pole에서 사용되는 부호는 ■ 는 Striation을, ● 는 Fault를, ◆ 는 Joint를, 그리고 +는 Lineation을 각각 나타내며, Great circle중 點線으로 표시된 것은 層理를 나타

낸다.

e) 斷層의 Striation 표시에서는 移動方向이 확실한 경우는 (Certain)↗로 표시되며, Probable의 경우는↗로, 그리고 Supposed인 경우는 |로 화살촉 모양이 생략된다.

f) Pole의 Contour diagram의 우측상단에 표시된 숫자들은 각 等高線의 값을 나타내며, 이값은 그 등고선 범위내에서 Pole이 나타날 수 있는 確率 分布의 값을 나타낸다 (Fig. 6-1, 6-2 참조).

檢討 및 討議

面構造 및 等高線등과 같은 지질구조의 요소들에 대한 統計處理를 위해 DROPOL Program의 Algorithm과 자료의 입출력에 대해 고찰한다. 3차원의 方向性을 갖는 자료들을 2차원의 평면상에 표시하기 위해 Wulff net 나 Schmidt net를 이용할 수 있으며, 필요에 따라 상반구 혹은 하반구 투영으로 자료를 도식화 할 수 있는 방법이다. 斷層面이나 層理面과 같은 면구조를 나타내는 대원은 주어진 不連續面上에서 $N 0^\circ$ 에서 $N 180^\circ$ 까지 角度의 變化에 따른 Lineation을 작도하는 원리를 이용하여 대원을 작도한다. 특히 단층면에서는 대원상에 Striation이 표시되며, 單層의 形態 및 移動方向이 각각 다르게 표시된다.

면구조의 극점이나 선구조의 集中度를 한눈으로 표시하기 위해 Contour diagram이 이용되는데, Density를 설정하기 위해 投影된 자료들을 직접 Counting을 실시하는 경우는 캔버스의 가장자리 부분에서 Counting circle이 타원형으로 변형되어 표시된다. 이를 改善하여 Huang(1987)에 의한 Contour 작도원리 및 Filtering 함수(Huang, et al. 1987)를 고려한 Program이 작성되었다. 또한 Rose diagram은 주향방향, 경사방향 및 경사의 분포를 5° 나 10° 의 간격으로 분류하여 각 방향에 따른 면구조의 빈도를 쉽게 확인할 수 있으며, 이것은 일반적인 형이나 Smooth형으로 작도가 가능하다.

앞으로 보다 入出力이 용이하고 斷層面 外에도 褶曲과 같은 지질자료도 쉽게 처리할 수 있는 보다 包括的인 Program의 개발이 요구된다.

參 考 文 獻

전용원, 전효택, 민경원 (1978) 컴퓨터에 의한 지질구조의

- 방향성 해석. 대한광산학회지, 15권, p. 263-266.
- Anderson, E. M. (1942) *The Dynamics of faulting* (2nd ed.). Oliver & Boyd, Edinburgh, 206p.
- Angelier, J. (1979) Determination of the mean principal directions of stress for a given fault population. *Tectonophysics*, v. 56, p. T17-T26.
- Angelier, J. (1983) Analyses qualitative et quantitative des populations de jeux de failles. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, (7), t. XXV, p. 661-672.
- Angelier, J. (1984) Tectonic analysis of fault slip data sets. *J. Geophy. Res.*, v. 89, B7, p. 5835-5848.
- Angelier, J. (1989) From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. *J. Struct. Geol.*, v. 11, p. 37-50.
- Bell, F. G. (1987) *Ground engineer's reference book*. chap. 12, Newnes-Butterworths.
- Duncan, A. L. (1981) A review of cartesian coordinate construction from sphere, for generation of two dimensional geological net projections. *Computers and Geosciences*, v. 7, p. 367-384.
- Etchecopar, A., Vasseur, G. and Daigniers, M. (1981) An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *J. Struct. Geol.*, v. 3, p. 61-65.
- Huang, Q., Angelier, J. and Mechler, P. (1987) Filtrage et diagrammes d'iso-densité : un apport à analyse de données orientées. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 304. Serie II, p. 377-382.
- Huang, Q. (1987) *Modélisation géométrique et dynamique de la fracturation*. Thèse de doctorat de Paris VI, 270p.
- Kalkani, E. C. and Von Frese, R. R. B. (1979) An efficient construction of equal-area fabric diagrams. *Computers Geosci.*, v. 5, p. 301-311.
- Kalkani, E. C. and Von Frese, R. R. B. (1980) Computer construction of equal-angle fabric diagrams and program comparisons. *Computer Geosci.*, v. 6, p. 279-288.
- Kalkani, E. C. and Von Frese, R. R. B. (1982) Convolution of fabric data to determine probability distribution. *J. Struct. Geol.*, v. 4, p. 93-103.
- Kamb, W. B. (1959) Ice petrofabric observations from Blue Glacier, Washington, in relation theory and experiments. *J. Geophy. Res.*, v. 64, p. 1891-1919.
- Kohlbert, F. and Scheidegger, A. E. (1977) On the theory of evaluation of joint orientation measurements. *Rock Mechanics*, v. 9, p. 9-25.
- Michael, A. (1984) Determination of stress from slip data: faults and folds. *J. Geophy. Res.*, v. 89, p. 11517-11526.
- Moody, J. D. and Hill, M. J., (1965) Wrench-fault tectonics. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 67, p. 1207-1246.
- Pilant, W. L. (1989) A PC-interactive stereonet plotting program. *Computers and Geosciences*, v. 15, p. 43-58.
- Robin, P. F. and Jowett, E. C. (1986) Computerized density contouring and statistical evaluation of orientation data using counting circles and continuous weighting function. *Tectonophysics*, v. 121, p. 207-223.
- Wilcox, R. E. and Seely, D. R. (1973) Basic Wrench Tectonics. *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, no. 1, p. 74-96.
- Woodcock, N. H. and Robertson, A. H. F. (1982) Wrench and thrust tectonics along a Mesozoic-Cenozoic continental margin: Antalya complex, SW Turkey. *J. Geol. Soc. London*, v. 139, p. 147-163.